

ÉVALUATION DE L'IMPACT DES FEUX D'ARTIFICE SUR L'ENVIRONNEMENT

Par
Gabrielle L.Lajoie

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement
et développement durable en vue de l'obtention du grade de maitre
en environnement (M. ENV.)

Sous la direction de monsieur Marc Olivier

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Janvier 2018

SOMMAIRE

Mots-clés : feux d'artifice, réglementation, pollution, persistance, contamination, risque sanitaire, eau de surface, sol, émission, atmosphère

La pollution d'origine anthropique est aujourd'hui au centre des discussions environnementales, mais plusieurs secteurs d'activité demeurent loin des projecteurs, à l'exemple des feux d'artifice. Ces derniers émettent une multitude de composés chimiques dans l'atmosphère qui retombent éventuellement à la surface de la Terre. Cela dit, la pyrotechnie et l'environnement sont deux domaines qu'encore trop peu d'études mettent en relation.

De surcroît, l'insuffisance de mesures législatives et la faible connaissance de la population sont une problématique majeure à l'instauration de normes de prévention et d'amenuisement. Cela est principalement causé par le manque d'ouvrages scientifiques traitant des composés émis, de même que leurs incidences atmosphériques, leurs effets sur les milieux aquatiques et terrestres et les dangers sanitaires potentiels.

L'objectif de cet essai est donc d'évaluer les impacts générés par les feux d'artifice sur l'environnement et de proposer des recommandations en lien avec les résultats formulés. Des recherches ont ainsi permis l'identification des substances rejetées lors de l'explosion d'artifice et, de là, plusieurs conséquences environnementales et sanitaires probantes ont pu être détaillées. Des constats ont ensuite été explicités pour finalement conclure que les activités pyrotechniques représentent un réel risque et qu'il est nécessaire de contrôler davantage ce secteur.

Cela dit, après l'étude des constats et des limites de l'essai, six recommandations ont été énoncées en vue d'atténuer les impacts causés par les émissions de feux d'artifice au Québec et, par extension, au Canada. Ces recommandations couvrent les domaines législatifs, scientifiques et sociaux, en ciblant les objets critiques devant être améliorés ou encore révisés. Elles visent notamment les aspects suivants : le renforcement de la législation; l'utilisation de pièces pyrotechniques moins dommageables pour l'environnement; l'accroissement des recherches scientifiques; l'analyse intégrale des facteurs d'émission et l'accessibilité aux données résultantes; la création de systèmes d'alerte sanitaire; et enfin la mise en place de campagnes de sensibilisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à remercier sincèrement mon directeur d’essai, monsieur Marc Olivier. Merci pour votre confiance, votre dévouement, votre savoir-faire et vos conseils précieux. Vous m’avez permis d’exprimer pleinement mes idées avec encouragement et enthousiasme tout en me guidant adroitement dans l’élaboration de ce document. Vous êtes un homme inspirant et avez mon plus grand respect.

J’aimerais ensuite adresser un merci particulier à ma mère et mon père pour leur soutien incommensurable, leur dévouement et leurs nombreux sacrifices. Vous avez toujours été à mes côtés et m’avez permis de m’épanouir pleinement. Vous êtes les meilleurs parents dont un enfant peut rêver.

Je souhaite également souligner le support continu de ma famille si chère à mes yeux, mes frères Laurier et Renaud, ma sœur Marithé, ma belle-sœur Charlotte, mes oncles et tantes ainsi que mes cousins et ma cousine Lara. Merci de m’accepter et de m’encourager dans mes nombreux projets depuis toujours, à mes yeux vous êtes parfaits.

Je désire à la fois mentionner l’appui tant apprécié de ma tante et mon oncle, Claire et Jean-Claude Pothier. Par votre générosité, vous avez facilité la poursuite de mes études à la maîtrise et m’avez procuré une profonde paix d’esprit.

Un grand merci à mes amies si précieuses avec qui j’ai partagé tant de moments inoubliables. Julie, Paule, Myriam, Sophie, Loanah et Andréanne, je ne serais pas la personne que je suis aujourd’hui sans vous. Vous êtes mes *partners in crime*, mes confidentes, mes conseillères, ma joie de vivre et ma folie. Telles à vos habitudes, vous avez été présentes tout au long de la rédaction de cet essai et je vous en suis immensément reconnaissante.

Je remercie finalement ma cohorte avec qui j’ai vécu tant de gammes d’émotions et de péripéties. Vous êtes les meilleurs et on a réussi!

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN SITUATION	3
1.1 Principes de fonctionnement.....	3
1.1.1 Dimension mécanique.....	4
1.1.2 Fondements chimiques	9
1.2 Intégration des feux d'artifice dans les pratiques canadiennes	11
1.2.1 Usages	11
1.2.2 Consommation	11
1.2.3 Activités commerciales	12
1.3 Portrait de la situation à l'étranger.....	13
1.3.1 Consommation mondiale	14
1.3.2 Grands producteurs	15
1.3.3 Évènements internationaux d'envergure	15
1.3.4 États-Unis	16
2. ENCADREMENT RÉGLEMENTAIRE.....	18
2.1 Législation fédérale.....	18
2.1.1 Loi sur les explosifs.....	18
2.1.2 Règlement de 2013 sur les explosifs.....	19
2.1.3 Normes environnementales.....	21
2.2 Législation provinciale	22
2.2.1 Loi sur les explosifs et Règlement d'application de la Loi sur les explosifs.....	22
2.2.2 Normes environnementales.....	22
2.3 Cadre municipal	25
3. COMPOSÉS TOXIQUES RELÂCHÉS DANS L'ENVIRONNEMENT.....	26
3.1 Particules en suspension.....	26
3.2 Métaux et métalloïdes	29
3.3 Oxydes.....	34
3.4 Ions hydrosolubles	35
3.5 Composés organiques.....	37
3.6 Synthèse du corpus littéraire.....	39

4.	IMPACT DES FEUX D'ARTIFICE SUR L'ENVIRONNEMENT	41
4.1	Conséquences atmosphériques des émissions polluantes.....	41
4.1.1	Effets des matières particulaires.....	42
4.1.2	Effets du SO ₂ et des NO _x	45
4.1.3	Effets de l'ozone troposphérique.....	46
4.1.4	Effets du perchlorate.....	46
4.1.5	Effets des POP	47
4.1.6	Pollution sonore	48
4.2	Conséquences des retombées polluantes sur les sols.....	48
4.2.1	Effets des matières particulaires au sol	49
4.2.2	Effets des métaux traces au sol.....	50
4.2.3	Effets du SO ₂ et NO _x au sol.....	51
4.2.4	Effets de l'ozone troposphérique au sol	53
4.2.5	Effet du perchlorate au sol.....	53
4.3	Conséquences des retombées polluantes sur les milieux aquatiques d'eau douce	54
4.3.1	Effets des métaux traces dans l'eau.....	54
4.3.2	Effets du SO ₂ et NO _x dans l'eau.....	56
4.3.3	Effets du perchlorate dans l'eau	57
4.3.4	Effets des POP dans l'eau	58
5.	CRITIQUES DES RISQUES ASSOCIÉS À L'USAGE.....	60
5.1	Constats	60
5.2	Estimation des émissions annuelles	64
5.3	Limites.....	67
5.4	Perspectives d'avenir	68
6.	RECOMMANDATIONS	71
6.1	Recommandation 1 : renforcer le cadre réglementaire	71
6.2	Recommandation 2 : imposer un pourcentage de pièces d'artifice sans perchlorate pour tous les spectacles à grand déploiement.....	71
6.3	Recommandation 3 : augmenter la surveillance et le suivi environnemental dans les sites d'exposition	72
6.4	Recommandation 4 : élaborer une table exhaustive des facteurs d'émission pyrotechniques ainsi qu'une base de données accessible à la population	72

6.5	Recommandation 5 : créer un système d’alerte de santé publique.....	73
6.6	Recommandation 6 : mise sur pied d’une campagne de sensibilisation.....	73
CONCLUSION		75
RÉFÉRENCES		77
ANNEXE 1 – GRILLE DE L’INFLUENCE ET DE L’INTÉRÊT DES PARTIES PRENANTES		89
ANNEXE 2 – FACTEURS D’ÉMISSION DE MÉTAUX		90

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Schéma d'une bombe aérienne et ses constituants.....	4
Figure 1.2	Réaction d'oxydoréduction produite lors de la déflagration d'un feu d'artifice.....	6
Figure 1.3	Réactions impliquées dans la décomposition thermique de la poudre noire.....	7
Figure 1.4	Montage pyrotechnique pour le lancement de bombes aériennes avec mortier.....	8
Figure 2.1	Pictogramme pour le transport de feux d'artifice à haute portée.....	19
Figure 3.1	Répartition géographique des concentrations de PM mesurées lors d'évènements pyrotechniques (a) PM _{2,5} (b) PM ₁₀	29
Figure 3.2	Variations des concentrations de métaux durant le festival de Diwali en Inde (a) Al, Ba, K et Mg (b) Fe, Sr, Cu, Na, Ca et Mn (c) Bi, Ni, As et V.....	32
Figure 3.3	Caractérisation de PM _{2,5} prélevées durant le Nouvel An en Chine (a) Image MET d'une PM _{2,5} (b) Fraction chimique des PM _{2,5} prélevées avant, pendant et après l'évènement.....	33
Figure 4.1	Stratifications atmosphériques.....	41
Tableau 1.1	Classification des feux d'artifice selon leur portée.....	3
Tableau 1.2	Paramètres de lancement d'une coquille selon sa taille.....	7
Tableau 1.3	Composés métalliques utilisés dans la confection des feux d'artifice.....	10
Tableau 1.4	Importation canadienne d'explosifs en 2016.....	13
Tableau 1.5	Importation d'articles pyrotechniques au Canada en 2016.....	13
Tableau 1.6	Pays ayant exporté mondialement le plus de feux d'artifice en 2016.....	14
Tableau 1.7	Entreprises engagées dans le commerce international des feux d'artifice.....	15
Tableau 2.1	Pièces pyrotechniques interdites au Canada.....	20
Tableau 2.2	Valeurs de référence pour six indicateurs de pollution atmosphérique.....	24
Tableau 2.3	Valeurs limites et lignes directrices pour certains métaux émis dans l'atmosphère.....	24
Tableau 3.1	Concentration de PM (µg/m ³) lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale.....	27
Tableau 3.2	Concentration de métaux (µg/m ³) lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale.....	31
Tableau 3.3	Concentrations de PM, SO ₂ , NO _x et O ₃ (µg/m ³) lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale.....	34
Tableau 3.4	Concentration d'IH lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale.....	36
Tableau 3.5	Caractéristiques clés de 49 études d'intérêts au sujet de l'effet des feux d'artifice sur les PM ambiantes.....	40
Tableau 4.1	Temps de résidence de certains gaz traces dans l'atmosphère.....	42
Tableau 5.1	Extrapolation des émissions pyrotechniques au Canada et aux États-Unis en 2016.....	66

LISTE DES ATOMES ET DES MOLÉCULES

Al	Aluminium
As	Arsenic
B	Bore
Ba	Baryum
BaCl ₂	Chlorure de baryum
Ba(ClO ₃) ₂	Chlorate de baryum
BaCO ₃	Carbonate de baryum
Ba(NO ₃) ₂	Nitrate de baryum
Be	Béryllium
Bi	Bismuth
C	Carbone
C ₈ H ₅ KO ₅	Phtalate acide de potassium
C ₁₀ H ₁₀ Fe	Ferrocène
C ₃₆ H ₇₀ CaO ₄	Stéarate de calcium
Ca	Calcium
Ca ²⁺	Ion calcium
CaCl ₂	Chlorure de calcium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaSO ₄	Sulfate de calcium
Cd	Cadmium
Cl ⁻	Ion chlorure
ClO ₃ ⁻	Chlorate
ClO ₄ ⁻	Perchlorate
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
Cr	Chrome
Cs	Césium
Cu	Cuivre
CuCl	Chlorure de cuivre(I)
CuCO ₃	Carbonate de cuivre
CuO	Oxyde de cuivre
Fe	Fer
H ₂ O	Eau
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
Hg	Mercure
K	Potassium

K^+	Ion potassium
$KClO_3$	Chlorate de potassium
$KClO_4$	Perchlorate de potassium
KNO_2	Nitrite de potassium
KNO_3	Nitrate de potassium
K_2CO_3	Carbonate de potassium
K_2S	Sulfure de potassium
K_2SO_4	Sulfate de potassium
Li	Lithium
Mg	Magnésium
Mg^{2+}	Ion magnésium
Mn	Manganèse
N_2	Diazote
Na	Sodium
Na^+	Ion sodium
$NaNO_3$	Nitrate de sodium
$Na_2C_2O_4$	Oxalate de sodium
Na_3AlF_6	Cryolite
NH_3	Ammoniac
NH_4^+	Ion ammonium
Ni	Nickel
NO	Monoxyde d'azote
NO_2	Dioxyde d'azote
NO_3^-	Nitrate
O_3	Ozone
Pd	Plomb
Rb	Rubidium
S	Soufre
Sb	Antimoine
Sc	Scandium
SO_2	Dioxyde de soufre
SO_3^{2-}	Sulfites
SO_4^{2-}	Ion sulfate
$S_2O_3^{2-}$	Thiosulfate
$S_2O_8^{2-}$	Peroxodisulfate
Sr	Strontium
SrC_2O_4	Oxalate de strontium
$SrCO_3$	Carbonate de strontium

$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	Nitrate de strontium
SrSO_4	Sulfate de strontium
Ti	Titane
Va	Vanadium
Zn	Zinc

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

APA	<i>American Pyrotechnics Association</i>
C _e	Carbone élémentaire
C _{org}	Carbone organique
C _{os}	Carbone organique secondaire
CCME	Conseil canadien des ministres de l'Environnement
CCS	Conseil canadien de la sécurité
CEAEC	<i>Canadian Explosives Association</i>
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CLEEN	Réseau de mise en application de la législation chimique européenne
CLG	<i>Coast Law Goup</i>
CNN	Commission de la capitale nationale
COV	Composé organique volatil
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CP	Chlorophénol
dB	Décibel
DEFRA	<i>Department for Environment Food and Rural Affairs</i>
DRE	Division de la réglementation des explosifs
DSSE	Division de la sécurité et de la sureté des explosifs
EC	Environnement Canada
Eh	Potentiel d'oxydoréduction
FA	Feux d'artifice
FE	Facteur d'émission
fg/m ³	Picogramme/mètre cube
FR	Forçage radiatif
G\$	Milliard de dollars canadiens
GC	Gouvernement du Canada
GES	Gaz à effet de serre
GQ	Gouvernement du Québec
h	Heure
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCB	Hexachlorobenzène
IH	Ion hydrosoluble
kg	Kilogramme
km	Kilomètre
LE	<i>Loi sur les explosifs</i>
LEQ	<i>Loi sur les explosifs québécoise</i>

LQE	<i>Loi sur la qualité de l'environnement</i>
LTMD	<i>Loi sur le transport des marchandises dangereuses</i>
m	Mètre
M\$	Million de dollars canadiens
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MET	Microscopie électronique en transmission
mg/kg	Milligramme/kilogramme
mm	Millimètre
MO	Matière organique
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
NAAQS	<i>Normes nationales américaines de qualité de l'air ambiant</i>
NCQAA	<i>Normes canadiennes de qualité de l'air ambiant</i>
ng/m ³	Nanogramme/mètre cube
nm	Nanomètre
NNWB	<i>Netherlands National Water Board</i>
OMS	Organisation mondiale de la santé
PCDD	Polychlorodibenzodioxines
PCDF	Polychlorodibenzofuranes
PCDD/F	Polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes
pg/m ³	Pétagramme/mètre cube
POP	Polluant organique persistant
PM	Matière particulaire
PM _{2,5}	Matière particulaire de 2,5 µm de diamètre et moins
PM ₁₀	Matière particulaire de 10 µm de diamètre et moins
ppb	Partie par milliard
ppm	Partie par million
RAA	<i>Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère</i>
RALE	<i>Règlement d'application de la Loi sur les explosifs</i>
RE	<i>Règlement de 2013 sur les explosifs</i>
RMD	<i>Règlement sur les matières dangereuses</i>
RNCan	Ressources naturelles Canada
s	Seconde
SC	Statistique Canada
SCF	Société chimique de France
SGQA	Système de gestion de la qualité de l'air
SH	Système harmonisé de consignation et de codification des marchandises
t	Tonne

TCE	<i>The Chemical Engineer</i>
TSP	Particule en suspension totale
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UVED	Université virtuelle environnement et développement
WTE _x	<i>World's Top Export</i>
μg/kg	Microgramme/kilogramme
μg/m ³	Microgramme/mètre cube
μm	Micromètre

LEXIQUE

Aérosol	Particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux présentant une vitesse de chute négligeable et dont le diamètre est inférieur à 100 µm (Dictionnaire environnement, s. d.)
Albédo	Mesure de la force avec laquelle un objet (ex. la glace) reflète le rayonnement. Il est quantifié comme la proportion réfléchi du rayonnement solaire incident de toutes les longueurs d'onde. (Gieré et Querol, 2010)
Contamination	Présence anormale d'une substance, d'un objet, d'un être vivant ou de microorganismes dans un milieu. (Lemière, Seguin, Le Guern, Guyonnet et Baranger, 2001)
Dextrine	Nom des polyholosides provenant de la dégradation de l'amidon par chauffage ou par hydrolyse. Sous forme de poudres insolubles dans l'eau, les dextrans sont employés dans les industries des colles, des colorants et des produits pharmaceutiques. (Larousse, s. d.a)
Eau de ruissèlement	Eau de pluie qui s'écoule sur la surface du sol. (Lemière et al., 2001)
Eaux de surface	Eaux douces superficielles (eaux stagnantes et eaux courantes), estuaires et eaux côtières. (Lemière et al., 2001)
Forçage radiatif	Terme décrivant comment un composé ou un processus influence l'équilibre de l'énergie entrante et sortante à la tropopause. Un forçage radiatif positif entraîne un réchauffement de surface moyen à l'échelle mondiale, alors qu'un forçage radiatif négatif produit un refroidissement de surface moyen à l'échelle mondiale. (Gieré et al., 2010)
Hygroscopicité	Tendance d'une substance à absorber l'humidité de l'air, mais pas nécessairement jusqu'au point de dissolution. (Gieré et al., 2010)
Lessivage	Entrainement par l'eau à travers les horizons de sols des substances fixées sur des particules fines. (Lemière et al., 2001)
Métal	Matériaux généralement durs, brillants, malléables, ductiles et fusibles ayant des conductivités thermique et électrique élevées. On en dénombre 88 pour le moment, classés dans 6 familles distinctes selon leurs similitudes de propriétés : les métaux alcalins, les métaux alcalinoterreux, les actinides, les métaux de transition et les métaux pauvres. Le caractère métallique est plus marqué chez les éléments situés au bas et à gauche du tableau périodique. (Greenwood et Earnshaw, 2003)

Métalloïde	Éléments dont les propriétés sont médianes entre celles des métaux et des non-métaux. Malgré leur aspect lustré, ils sont friables et offrent une faible résistance mécanique. Ils peuvent toutefois former des alliages avec les métaux et être utilisés, entre autres, dans la fabrication de pièces pyrotechniques. Ils sont cependant majoritairement employés comme semi-conducteur compte tenu de leur conductivité intermédiaire. Les éléments inclus dans cette famille ne sont pas encore fixés en raison de leurs propriétés mixtes, mais sept sont généralement reconnus : le B, Si, Ge, As, Sb, Te et At. (Greenwood et al., 2003)
Oxyde	Composés constitués d'un ou plusieurs atomes d'oxygène combinés avec un autre élément chimique moins électronégatif. En fait, seul le fluor possède une électronégativité plus élevée que l'oxygène. Ils peuvent se trouver sous forme gazeuse, liquide ou solide et être de nature acide (ex. H_2SO_4), basiques (ex. NaOH), amphotères (ex. Al_2O_3) ou neutre (ex. CO). La majorité des métaux forment des oxydes métalliques au contact avec l'oxygène. (SBEC Compagny, s. d.)
Oxydoréduction	Action chimique d'un corps oxydant sur un corps réducteur, avec à la fois une oxydation du réducteur et une réduction de l'oxydant. (Larousse, s. d.c)
Papier Kraft	Papier d'emballage très résistant, fabriqué avec de la pâte kraft écrue ou blanchie. (Larousse, s. d.b)
Particule en suspension	Mélange de gouttelettes liquides et solides en suspension dans l'air. Certaines particules sont libérées directement d'une source spécifique, tandis que d'autres se forment dans l'atmosphère par des réactions chimiques complexes. Leur taille varie entre 100 μm et 100 nm. (Shabushnig, 2014)
Particule fine	Particule de diamètre inférieur à 2,5 μm . (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique [CITEPA], 2017)
Particule grossière	Particule de diamètre supérieur à 2,5 μm . (Gieré et al., 2010)
Persistance	Propriété que possède un xénobiotique à demeurer présent dans l'environnement. Se mesure par la durée nécessaire pour obtenir une dégradation complète ou partielle (demi-vie). (Lemière et al., 2001)
Polluant	Produit, substance ou composé chimique responsable d'une pollution. Deux types sont distingués : les polluants primaires sont rejetés directement dans le milieu naturel et les polluants secondaires proviennent de réactions à la surface des polluants primaires, ou entre eux. (Lemière et al., 2001)

Pollution	Introduction par l'activité humaine de substances, préparations, de chaleur ou de bruit dans l'environnement, susceptibles de contribuer ou de causer un danger pour la santé humaine, des détériorations aux écosystèmes ou matériels et une entrave à un usage légitime de l'environnement. (Lemière et al., 2001)
Pyrotechnie	Art de préparer des pièces de feu d'artifice. (Dictionnaire de l'Académie française, 1932)
Quantité nette d'explosifs	Poids réel de l'explosif, sans comprendre l'emballage, les câbles ou les fils, et les enveloppes. (Gouvernement du Canada [GC], 2010)
Spéciation	Définition de la forme chimique ou de la phase réceptrice, dans laquelle se trouve un élément (forme ionique, structure moléculaire, association physique, support minéral ou organique). (Lemière et al., 2001)
Toxicité	Propriété d'une substance chimique introduite dans un organisme, d'engendrer temporairement ou non, des troubles de certaines fonctions biologiques. (Lemière et al., 2001)
Valeur nette d'exportation	Valeur totale d'exportation moins la valeur totale d'importation d'un pays. (World's top export [WTE], 2017)

INTRODUCTION

Depuis un millénaire, les feux d'artifice sont employés lors de spectacles pyrotechniques et font maintenant partie intégrale de la culture moderne (Gralon, 2008). Bien que leur utilisation soit perçue comme un événement festif et rassembleur, leur emploi pose actuellement un réel questionnement pour la communauté environnementale.

Les feux d'artifice sont principalement constitués de poudre noire, à laquelle s'ajoutent plusieurs éléments chimiques nécessaires à leur coloration (Ruswell, 2009). Cette poudre, originaire de Chine, est un mélange de soufre, de charbon et de salpêtre et permet à la bombe de se propulser et d'exploser. En éclatant, celle-ci libère des millions de particules fines, une importante quantité de gaz ainsi qu'un amalgame de composés, notamment des perchlorates, des oxydes et des métaux (Wang et al., 2007). Tous ces éléments se retrouvent donc dans l'environnement et contribuent à la contamination des écosystèmes.

Il est démontré que pour un événement d'envergure, soit la fête du 4 juillet aux États-Unis, près de 15 tonnes de dioxyde de carbone sont relâchées dans l'atmosphère (E-RSE, 2016). Un peu plus au nord, l'International des Feux Loto-Québec cause quant à lui des sommets de pollution depuis 2002. En effet, des concentrations de particules fines égales à 10 000 microgrammes/mètre cube ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont mesurées au cours d'une représentation, alors que le seuil sanitaire est de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Qui plus est, la station de surveillance de la qualité de l'air d'Hochelaga a calculé à plusieurs reprises des taux 10 fois plus élevés que les valeurs de fonds dans l'heure suivant le début des feux (Cameron, 2008, 19 juillet). Cela dit, les célébrations du millénaire ont causé un épisode de pollution atmosphérique mondiale, surplombant des zones peuplées de « composés soufrés cancérigènes et d'arsenic en suspension » (Beaudry, 2017). Bien que d'importants investissements sont déployés pour réduire la pollution urbaine, et que les normes environnementales resserrent sans cesse les taux d'émission des industries, la pollution résultant des artifices demeure quant à elle incontrôlée.

De fait, peu d'ouvrages se penchent sur les impacts liés aux feux d'artifice et la notion de pollution pyrotechnique est un terme encore méconnu de la majorité de la population. Or, selon les informations exposées précédemment, il semble légitime de se questionner quant aux dangers que représentent ces articles sur l'environnement et de mener une étude plus approfondie.

Dans cet ordre d'idées, l'objectif principal du présent essai consiste à l'évaluation des impacts générés par les feux d'artifice sur l'environnement. Cet objectif sera atteint par la réalisation de 6 sous-objectifs. Il sera tout d'abord question d'exposer la diversité chimique des feux tout en dressant un portrait de la situation

au Canada et à l'international. Par la suite, les diverses législations touchant de près ou de loin à ce secteur d'activité seront mises en commun pour subséquemment répertorier des valeurs, tant qualitatives que quantitatives, en lien avec les composés toxiques relâchés. Il s'en suivra une discussion des risques associés à l'usage, pour finalement formuler des recommandations éclairées quant aux actions concrètes à entreprendre pour limiter les préjudices environnementaux.

Les informations retenues sont basées sur un corpus littéraire complet et récent, en s'assurant de la fiabilité des sources et de la pertinence des renseignements amassés. De nombreuses recherches ont permis de cibler des rapports provenant majoritairement de la littérature scientifique dans les domaines de la chimie et de l'environnement. D'autant plus, les ouvrages priorisés provenaient de périodiques, de publications gouvernementales, de mémoires et d'articles de quotidien. D'ailleurs, les informations exposées dans cet essai ont été rapatriées à partir de publications qui s'appuient sur une notoriété substantielle de l'auteur ou de l'organisation. Enfin, des acteurs dans le domaine ont été consultés par téléphone et par courriel, ce qui a permis de valider, en partie, l'information obtenue lors des recherches.

Cet essai est composé de six chapitres. Le chapitre un présente le contexte situationnel du secteur de la pyrotechnie et explique les principes de fonctionnement d'artifices aéroportés de même que leur intégration dans les pratiques au Canada, tout en exposant la situation à l'étranger. Le deuxième chapitre décrit le cadre législatif entourant les feux d'artifice et détaille le partage des pouvoirs entre les paliers gouvernementaux fédéral, provincial et municipal. Pour sa part, le chapitre trois recense les substances relâchées dans l'environnement en s'appuyant sur des recherches scientifiques menées internationalement et énumère la nature des particules en suspension, des métaux, des oxydes, des ions hydrosolubles et des composés organiques émis. Suite aux résultats présentés dans ce volet, le chapitre quatre évalue les répercussions potentielles des émissions polluantes sur l'atmosphère, les sols et les eaux douces. Par la suite, le chapitre cinq expose une appréciation critique des risques associés aux activités pyrotechniques et les limites encourues, en plus de dénombrer certaines technologies plus écologiques. Finalement, le chapitre 6 avance six recommandations en lien avec les constats formulés aux rubriques précédentes.

1. MISE EN SITUATION

Ce chapitre approfondit le contexte autour duquel gravite la sphère de la pyrotechnie. Il présente notamment un portrait des différents principes de fonctionnement des feux d'artifice à grand déploiement, met de l'avant leur intégration dans les pratiques au Canada, pour enfin décrire la situation à l'étranger.

1.1 Principes de fonctionnement

Il existe actuellement quatre catégories de pièces pyrotechniques au Canada, classant l'ensemble des feux d'artifice selon leur construction et usage. Elles sont divisées comme suit : pièces pyrotechniques à l'usage des consommateurs, pièces pyrotechniques à grand déploiement, fusées miniatures, articles d'utilisation pratique et effets pyrotechniques spéciaux (GC, 2010).

Les festivités d'envergure emploient des feux d'artifice à grand déploiement, allant de pièces à haute et à basse portée aux articles à déploiement au sol. Le tableau 1.1 résume les types d'artifice inclus sous chacune de ces trois classes. Néanmoins, la composante la plus utilisée lors de spectacles est le feu d'artifice de haute portée nommé bombe aérienne (GC, 2010). Le caractère fonctionnel ainsi que les fondements physique et chimique de cette dernière sont expliqués dans la présente section.

Tableau 1.1 Classification des feux d'artifice selon leur portée (inspiré de : GC, 2010)

Pièces pyrotechniques	Types
De haute portée	
<i>Plus de 50 m d'altitude</i>	Bombes aériennes
	Comètes
	Grosses chandelles romaines
De basse portée	
<i>Moins de 50 m d'altitude</i>	Chandelles romaines
	Mines
	Batteries/combinaisons
	Soucoupes volantes
À déploiement au sol	
<i>Moins de 15 m d'altitude</i>	Fontaines
	Gerbes
	Cascades
	Pièces montées avec lances
	Roues

1.1.1 Dimension mécanique

Les propriétés physiques et mécaniques de la bombe aérienne, ou coquille aérienne, sont régies selon cinq composantes essentielles : la coquille, les mèches, la charge d'éclatement, la charge propulsive et les étoiles (GC, 2010; Lancaster, 1998). La figure 1.1 illustre les éléments d'une bombe aérienne.

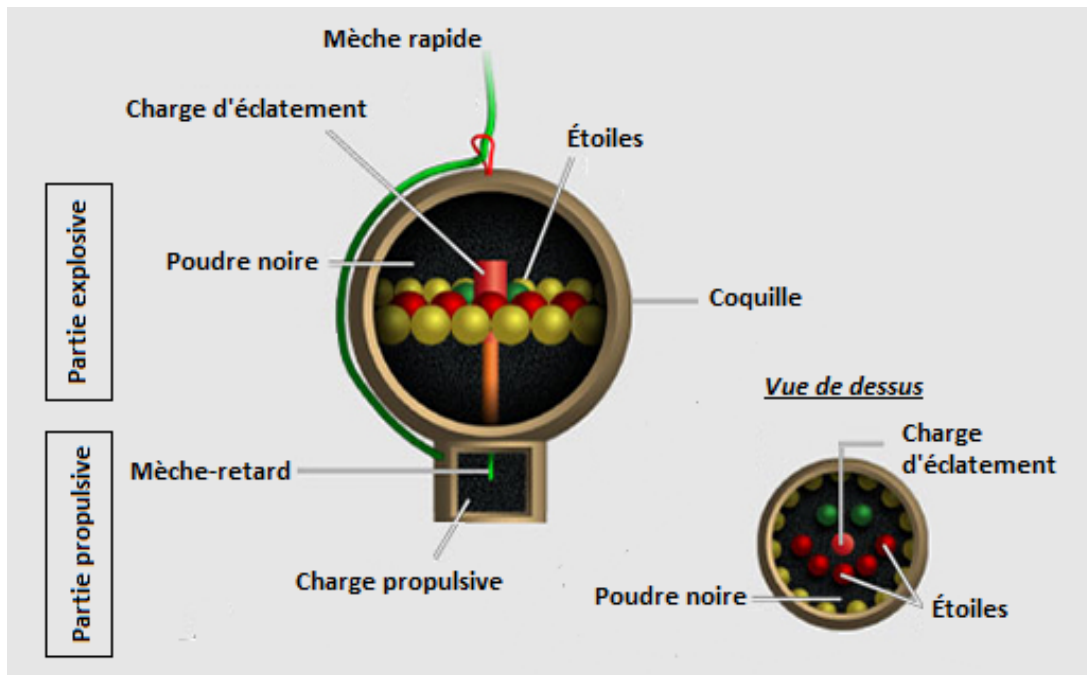


Figure 1.1 Schéma d'une bombe aérienne et ses constituants (modifié de : Kirkpatrick, 2015)

La coquille

La coquille est la pièce d'artifice propulsée en altitude qui explose au moment de son apogée. Elle joue le rôle de récipient et renferme les substances chimiques responsables de la dispersion et de la manifestation des gerbes lumineuses lors de spectacles pyrotechniques.

La forme la plus couramment observée est la coque de type sphérique en raison de son faible coût et de son procédé de préparation simple. Elle est confectionnée par la superposition de plusieurs lanières de papiers préalablement enduites d'une solution pâteuse. Un moule est aussi utilisé afin d'éviter toutes déformations. Elle est produite en plusieurs tailles, allant de 50 millimètres (mm) à 400 mm de diamètre, les plus populaires étant celles de 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm et 200 mm (Lancaster, 1998). Un spectacle de moins grande envergure emploie des coques de 50 mm à 150 mm qui atteignent une hauteur maximale de 150 m. Les représentations plus imposantes utilisent des coquilles jusqu'à 1 m de diamètre projetées à 300 m d'altitude. (Siegel, 2016, 1er juillet)

La coquille de forme cylindrique est une deuxième variante de la bombe aérienne et permet d'obtenir des effets pyrotechniques de qualité supérieure. Également produite au moyen de papier, elle est toutefois moins employée en raison de son prix élevé et de son procédé de fabrication plus complexe. La difficulté réside dans les diverses étapes de fabrication (formation du cylindre, chargement des composés, scellage des extrémités, enroulement de l'unité avec une ficelle et ajout final de papiers Kraft) (Russell, 2009). Afin de pallier à cette réalité, des coques cylindriques bon marché sont improvisées à l'aide de boîtes de conserve et de bouchons. L'effet n'est pas aussi impressionnant, mais cette alternative est tout de même appréciée des professionnels (Lancaster, 1998).

Bien que les procédés de fabrication des coquilles aériennes n'aient guère évolué depuis leur invention, les coques en plastique sont maintenant très répandues et vendues chez la plupart des détaillants. Elles ont pour avantage d'être rapides, faciles et simples à assembler en plus de pouvoir contenir la charge propulsive (Russell, 2009). Elles ne produisent toutefois pas un éclat parfaitement symétrique et occasionnent le rejet d'une multitude de débris plastique dans l'environnement, détériorant ainsi les sites adjacents (Lancaster, 1998).

Les charges explosives

Utilisée depuis des siècles, la poudre noire est encore aujourd'hui le mélange détonant le plus employé dans le domaine de la pyrotechnie. Elle est constituée de combustibles, soit le carbone (C) et le soufre (S), et d'un comburant, le nitrate de potassium (KNO_3). Ce dernier est un puissant oxydant qui se décompose à haute température afin de fournir l'oxygène nécessaire à la combustion. La proportion de chacun des composants du mélange est pratiquement restée inchangée avec les années, avec un taux de 15 %, 10 % et 75 % respectivement. Elle est souvent employée comme charge d'éclatement et de propulsion.

La charge d'éclatement est située dans la coquille (figure 1.1) et s'enflamme lorsque la bombe atteint l'apogée de sa trajectoire. Il y a alors explosion de la coque et dispersion des étoiles dans l'atmosphère. Les charges d'éclatement les plus communes sont la poudre noire et la poudre éclair. La poudre éclair est un composé extrêmement puissant qui émet une lumière intense et un bruit détonant. Elle est normalement constituée de 70 % en masse de KClO_3 pour 30 % d'un mélange de poudre d'aluminium (Al) et de S. (Lancaster, 1998)

Les étoiles

Les étoiles sont les éléments qui se dispersent dans le ciel lors de l'explosion de la coquille et éclatent en une variété de germes lumineux et colorés. Malgré un grand éventail pouvant être manufacturé, seulement cinq types sont couramment déployés : cylindrique, sphérique, cubique, pressé et emboité. C'est la forme cylindrique qui est toutefois la plus utilisée dans l'hémisphère ouest en raison de sa confection rapide et simple.

Le processus de fabrication, la taille ainsi que la composition chimique des étoiles ont tous un effet sur l'apparence du feu d'artifice. Nonobstant, elles sont toujours constituées d'un mélange incluant les cinq espèces suivantes (Harrison et Shallcross, 2011) :

- Agent oxydant, sous forme de nitrate (NO_3^-), chlorate (ClO_3^-) ou ClO_4^- ;
- Carburant de poudre métalloïde ou poudre noire;
- Colorant formé d'un sel métallique;
- Agent réducteur, sous forme de charbon ou de soufre;
- Ligand de dextrine, poudre de gomme arabique ou résine.

Les composés métalliques sont responsables des couleurs captées par l'œil. Ils sont liés aux autres constituants à l'aide d'un agent de liaison et dispersés en altitude après l'explosion de la coquille. Cette déflagration est induite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxydant et le carburant suite au gain d'énergie thermique provoqué par l'étincelle. L'oxydant libère alors des atomes d'oxygène qui sont captés par les atomes de C et de S de la poudre noire. Il s'en suit la formation de fumée (K_2S) et de gaz (N_2 et CO_2), relâchés dans l'atmosphère (Russell, 2009). La figure 1.2 montre la réaction d'oxydoréduction résultante.



Figure 1.2 Réaction d'oxydoréduction produite lors de la déflagration d'un feu d'artifice (inspiré de : Petit, 1998, p. 29)

Le mécanisme réactionnel de la décomposition thermique de la poudre noire est montré à la figure 1.3. La formation des composés gazeux responsables de l'effet propulseur et de l'éclatement du feu d'artifice est indiquée à l'équation 1.8.

$S + \text{matériel organique} \longrightarrow H_2S$	Eq. 1.1
$KNO_3 + \text{matériel organique} \longrightarrow NO_2$	Eq. 1.2
$2KNO_3 + S \longrightarrow K_2SO_4 + 2NO$	Eq. 1.3
$KNO_3 + 2NO \longrightarrow KNO_2 + NO + NO_2$	Eq. 1.4
$H_2S + NO_2 \longrightarrow H_2O + S + NO$	Eq. 1.5
$2NO_2 + 2S \longrightarrow 2SO_2 + N_2$	Eq. 1.6
$2KNO_3 + SO_2 \longrightarrow K_2SO_4 + 2NO_2$	Eq. 1.7
$4KNO_3(s) + 7C(s) + S(s) \longrightarrow 3CO_2(g) + 3CO(g) + 2N_2(g) + K_2CO_3(s) + K_2S(s)$	Eq. 1.8

Figure 1.3 Réactions impliquées dans la décomposition thermique de la poudre noire (inspiré de : Russell, 2009)

Enfin, l'agencement des étoiles à l'intérieur de la coquille permet d'obtenir différents motifs géométriques. Pour ce faire, celles-ci sont disposées autour d'une charge d'éclatement selon l'image souhaitée. Par exemple, une déflagration sphérique est acquise en plaçant les étoiles contre la paroi interne de la coquille pour après y ajouter la charge en son centre. Cette dernière va ensuite propulser les étoiles vers l'extérieur et engendrer un feu d'artifice s'étalant sur plusieurs mètres (m) dans le ciel. (Brain, s. d.). Le tableau 1.2 présente les paramètres de lancement d'une bombe aérienne selon sa taille.

Tableau 1.2 Paramètres de lancement d'une coquille selon sa taille (tiré de : Gauthier et Olivier, 2004)

Diamètre de la coquille (mm)	Masse de la coquille (kg)	Hauteur d'éclatement (m)	Rayon d'éclatement (m)	Délai d'éclatement (s)
80	0,13	125	3,9	3,0
100	0,36	170	5,5	3,5
120	0,68	220	6,6	4,0
150	1,1	240	7,8	5,0
200	2,5	300	12,5	6,0
250	5,0	335	13,3	6,5
300	8,2	367	14,0	7,0

Séquences de mise à feu

Tout d'abord, une charge propulsive est attachée à la base de la coquille et le tout est déposé au fond d'un mortier. Le mortier est un élément essentiel à la mise à feu de pièce pyrotechnique et consiste en un tube

fait de résine époxy, de polyéthylène haute densité ou d'acier (GC, 2010). Il permet à la bombe d'être projetée au ciel à grande vitesse, et ce sur une longue distance.

Par la suite, un câble électrique lié à un tableau de contrôle crée une étincelle à l'extrémité de la mèche rapide qui va ensuite enflammer la charge propulsive. Subséquemment, la chaleur dégagée et les gaz emmagasinés à l'intérieur du mortier vont exercer une énorme pression positive jusqu'à l'éclatement, propulsant la coquille. Simultanément, la mèche-retard (figure 1.1) enfouie à l'intérieur de la coque est initiée et, après un temps prédéterminé, la flamme atteint le cœur du feu d'artifice et précipite la déflagration du mélange de poudre noire et d'étoiles. La mèche-retard prend quelques secondes à atteindre le centre de la bombe, ce qui permet à la déflagration principale de ne pas se faire au sol (Siegel, 2016, 1er juillet). Cette réaction en chaîne produit une énorme quantité de chaleur et de gaz, provoquant l'éclatement de la coque et la projection des étoiles dans toutes les directions. Le son qui accompagne l'explosion est causé par l'expansion des gaz à une vitesse plus élevée que celle du son (De Antonis, 2010). La figure 1.4 illustre le montage nécessaire au lancement d'une série de bombes aériennes.

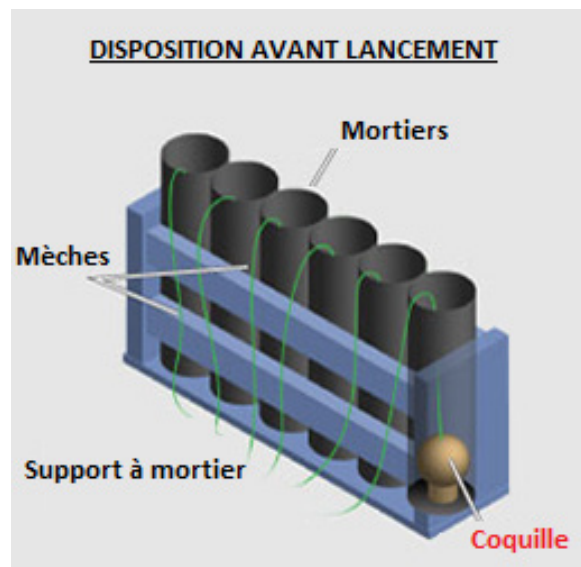


Figure 1.4 Montage pyrotechnique pour le lancement de bombes aériennes avec mortier (modifié de : Kirkpatrick, 2015)

Élément important, la quantité de charges utilisée doit être proportionnelle à la taille de la bombe afin d'atteindre la hauteur désirée. Toutefois, certains concepteurs utilisent de l'air comprimé comme propulseur. Cette nouvelle technique est plus sûre, engendre une plus grande précision et est moins dommageable pour l'environnement (Jeffries, 2013).

1.1.2 Fondements chimiques

Le spectacle lumineux et coloré observé lors d'un événement pyrotechnique est engendré selon trois phénomènes : l'incandescence, l'émission atomique et l'émission moléculaire. Le premier phénomène est l'incandescence des particules d'oxyde métallique formées lors de la combustion. Cela se produit lorsqu'un corps chauffé à une température élevée émet un rayonnement électromagnétique dans le spectre visible. La couleur de ces rayonnements est directement liée à la température de la surface du corps, émettant d'abord dans l'infrarouge, pour ensuite aller du blanc rouge (1000 °C) au blanc éblouissant (3000 °C) (Société chimique de France [SCF], s. d.). Cette manifestation est possible grâce, entre autres, au magnésium. Qui plus est, des particules métalliques de grande taille sont utilisées afin d'obtenir des étincelles de plus longue durée, car leur combustion se poursuit sur un plus grand laps de temps.

Le second phénomène est l'émission atomique. La chaleur intense excite les électrons de l'atome métallique et leur permet de passer d'un niveau d'énergie fondamental vers un état excité supérieur. En retournant à l'état fondamental, phénomène nommé relaxation, l'énergie emmagasinée est émise sous forme de photons avec une longueur d'onde propre à chaque élément chimique. Cette longueur d'onde est perçue par l'homme sous forme de couleur. Seules les longueurs d'onde entre 380 nanomètres (nm) (violet) et 780 nm (rouge) peuvent être observées par l'œil humain. (Université virtuelle environnement et développement [UVED], s. d.).

Bien que semblable à l'émission atomique, l'émission moléculaire résulte d'une transition électronique entre deux niveaux d'énergie. Il est toutefois plus difficile de prévoir à quelle longueur d'onde les photons seront émis, car ceux-ci passent par différents niveaux énergétiques. De plus, une température trop intense risque de briser les liens interatomiques et ainsi dénaturer la molécule (Mocella, s. d.).

Par exemple, afin d'obtenir une couleur rouge, les étoiles sont habituellement faites du mélange suivant : 28 % magnésium (Mg), 20 % nitrate de strontium ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$), 20 % perchlorate de potassium (KClO_4) et 8 % d'oxalate de strontium (SrC_2O_4). Dans le cas présent, le Mg est le comburant oxydé lors de la combustion des trois autres substances, propageant ainsi la réaction. À mesure que la chaleur augmente, les molécules de $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ et SrC_2O_4 vont absorber l'énergie générée afin d'exciter leurs électrons, pour ensuite libérer des rayonnements électromagnétiques lors de la relaxation (Mocella, s. d.).

Les pyrotechniciens peuvent aussi mélanger différents sels métalliques afin de produire un large éventail de couleurs et de nuances. Le tableau 1.3 présente divers composés couramment utilisés dans le domaine de la pyrotechnie.

Tableau 1.3 Composés métalliques utilisés dans la confection des feux d'artifice (compilation d'après :
Brunning, 2013 et GC, 2010)

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Composés	Formule chimique
Rouge	620-750	Nitrate de strontium	$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$
		Carbonate de strontium	SrCO_3
		Sulfate de strontium	SrSO_4
		Lithium	Li
Orange	590-620	Carbonate de calcium	CaCO_3
		Chlorure de Calcium	CaCl_2
		Sulfate de calcium	CaSO_4
Jaune	570-590	Nitrate de sodium	NaNO_3
		Oxalate de sodium	$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$
		Cryolite	Na_3AlF_6
Or	590	Charbon	Charbon
		Fer	Fe
		Noir de carbone	C
Blanc électrique	564-576	Fusion du titane	Ti
		Fusion de l'aluminium	Al
		Fusion du béryllium	Be
		Fusion du magnésium	Mg
Vert	495-570	Nitrate de baryum	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$
		Carbonate de baryum	BaCO_3
		Chlorure de baryum	BaCl_2
		Chlorate de baryum	$\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$
Bleu	450-495	Chlorure de cuivre(I)	CuCl
		Carbonate de cuivre	CuCO_3
		Oxyde de cuivre	CuO
Indigo	450-420	Césium	Cs
Violet	380-450	Potassium	K
		Rubidium (rouge-violet)	Rb
Argent	412	Fusion Aluminium ou Magnésium	Al ou Mg
Scintillement		Antimoine	Sb
Étincelles		Aluminium	Al
Fumées		Zinc	Zn

1.2 Intégration des feux d'artifice dans les pratiques canadiennes

Cette section dresse un portrait des usages, de la consommation et des activités commerciales entourant l'univers de la pyrotechnie dans le contexte canadien.

1.2.1 Usages

Les pièces pyrotechniques à l'usage des consommateurs sont réservées aux personnes de 18 ans et plus et sont vendues chez certains détaillants. Ces derniers doivent se soumettre aux exigences incluses dans la Loi sur les explosifs et répondre, entre autres, aux obligations légales en ce qui a trait au stockage et à l'étalage (Ressources naturelles Canada [RNCAN], 2009). Ce sont des pièces à faible risque conçues pour l'amusement, comprenant les chandelles romaines, les cierges merveilleux, les fontaines, les volcans, les mines et les serpentins. (RNCAN, 2017a)

Or, les feux d'artifice à grand déploiement représentent un haut risque de dangerosité et sont destinés à l'usage des professionnels. Ceux-ci comprennent les bombes, les barrages, les chandelles romaines, les chutes d'eau, les lances ainsi que les roues. Les pièces pyrotechniques utilisées dans l'industrie du divertissement sont aussi affectées à l'emploi de personnels qualifiés et comptent les gerbes, les mines, les comètes et les crossettes. De plus, cette classe inclut les articles destinés aux prestations en direct et aux entreprises de cinéma et de télévision (RNCAN, 2017a). Il est nécessaire d'acquérir une certification de RNCAN et d'obtenir le titre de pyrotechnicien afin d'utiliser de telles bombes. Il existe quatre classes de certification : pyrotechnicien, pyrotechnicien principal, pyrotechnicien des effets spéciaux et pyrotechnicien des effets spéciaux-cordeau détonant. Chaque permis est valide pour une durée maximale de cinq ans (RNCAN, 2017b).

1.2.2 Consommation

L'international des Feux Loto-Québec tenu à La Ronde est l'évènement pyrotechnique le plus important au Québec et attire près de 3 millions de spectateurs tous les ans (Huffpost, 2016). Créé en 1985, il projette chaque saison estivale huit spectacles d'une durée minimale de 30 minutes, mettant en vedettes des artistes internationaux de renom. Au total, 94 firmes provenant de 29 pays différents ont participé à l'évènement et plus de 290 représentations ont été exposées (La Ronde, 2017). Les artificiers usent en moyenne de 3500 à 5000 pièces d'artifices à chaque prestation et peuvent même déployer jusqu'à 10 000 bombes dépendamment de la grosseur et de la charge utilisée. Une soirée typique peut valoir entre 125 000 \$ et 200 000 \$ (Muckle, 2017, 13 juillet).

Fait notable, les feux d'artifice du 150^e anniversaire du Canada à Ottawa ont été les plus coûteux de l'histoire canadienne. Un total de 15 000 tirs pyrotechniques, 150 bombes aériennes de calibres 200 à 300 mm, 150 marrons d'air de 50 mm et 150 marrons d'air de 75 mm ont été propulsés dans le ciel, à l'opposé de 7000 tirs lors des feux d'anniversaire de l'année 2016. La facture de la soirée s'est élevée à 224 000 \$, soit 150 000 \$ de plus que l'édition 2015 (St-Pierre, 2017, 5 août).

Les expositions dans les petites villes coutent généralement de 2000 \$ à 7000 \$ pour un spectacle simple et court. L'intégration de la musique, de la coordination informatique et de pièces plus imposantes peuvent augmenter le prix à environ 2000 \$ la minute et à plus de 20 000 \$ pour un affichage complet (Korch, 2012, 27 juin). Pour les soirées privées ou familiales, une représentation peut valoir de 500 \$ à 2000 \$ selon la durée et le budget alloué (Guide organisateur, s. d.).

1.2.3 Activités commerciales

En 2016, la valeur totale d'explosifs importés au Canada était de 210 millions de dollars canadiens (M\$) (SC, 2017). Les articles pyrotechniques représentent 15 M\$ de ce montant et constituent une importation de 3900 tonnes (t) d'articles (Harvey, 2017, 21 mai). En somme, cinq importateurs canadiens, dont 2 d'origine québécoise (BEM souvenirs et feux d'artifice inc.; Royal pyrotechnie inc.), compilent 78 % des importations pour une valeur globale de 11,5 M\$ (GC, 2015). Ces compagnies développent et importent des pièces d'artifice provenant de manufacturiers à travers le monde afin d'en faire la vente sur l'ensemble du pays. Il n'existe aucune usine de fabrication de feux d'artifice au Canada, d'où le besoin pour les commerçants de se tourner vers l'international. Certains d'entre eux conçoivent toutefois leurs propres pièces et engagent une compagnie étrangère pour les produire. Un partenariat peut aussi être établi entre ces deux instances. (M. Sutherland, conversation téléphonique, 11 octobre 2017)

Le tableau 1.4 énonce les catégories et les quantités d'explosifs importés au Canada en 2016. Les statistiques sur l'importation sont classées et publiées conformément au Système harmonisé de consignation et de codification des marchandises (SH) utilisé par Statistique Canada (SC). Les poids indiqués proviennent d'une estimation établie par SC à partir de facteurs appliqués à la valeur des produits (RNCAN, 2003). Ces données doivent donc être employées avec discernement.

Tableau 1.4 Importation canadienne d'explosifs en 2016 (modifié de : SC, 2017)

	2016	
	Valeur (M\$)	Quantité (t)
Explosifs préparés, autres que les poudres propulsives	93	46 796
Mèches de sureté, cordeau détonnant	87	
Amorces détonantes		
Allumeurs et détonateurs électriques		
Amorces à percussion		
<i>Feux d'artifice</i>	21	4216
Fusées paragrêles, signaux de brume		
Fusées éclairantes de signalisation		
Poudres propulsives	9	368

Le tableau 1.5 illustre le pourcentage d'articles pyrotechniques en provenance de différents pays. La Chine subvient à 90 % des importations canadiennes et les États-Unis arrivent en troisième position, avec seulement 3,7 % des parts du marché.

Tableau 1.5 Importation d'articles pyrotechniques au Canada en 2016 (modifié de : SC, 2017)

Pays de provenance	Importance relative (%)
Chine	90,0
Espagne	4,0
États-Unis	3,7
Mexique	0,6
Suisse	0,4
Suède	0,4
Italie	0,3
Thaïlande	0,3
Royaume-Uni	0,2
Australie	0,1

1.3 Portrait de la situation à l'étranger

Ce chapitre dresse un portrait du secteur pyrotechnique à l'international. Il décrit dans un premier temps la consommation planétaire de pièces d'artifice, énumèrent ensuite les grands producteurs et les événements d'envergure mondiaux pour enfin présenter sommairement le contexte américain.

1.3.1 Consommation mondiale

Les ventes mondiales d'exportations de feux d'artifice se sont élevées à 1,04 milliard de dollars canadiens (G\$) en 2016. En moyenne, la valeur des exportations a augmenté de 0,3 % pour tous les pays exportateurs depuis 2012. Les pays asiatiques ont obtenu un capital d'exportation supérieur aux autres continents, soit une retombée totale de 922 M\$. Les exportateurs européens détiennent la deuxième position avec 9,9 % du marché, alors que seulement 1,3 % des expéditions mondiales proviennent d'Amérique du Nord (WTEx, 2017). Le tableau 1.6 détaille la liste des pays ayant exporté la plus haute valeur monétaire de feux d'artifice.

Tableau 1.6 Pays ayant exporté mondialement le plus de feux d'artifice en 2016 (modifié de : WTEx, 2017)

Pays	Valeur (M\$)	Importance des exportations mondiales (%)
Chine	919	88
Pays-Bas	30,5	2,9
Espagne	14,2	1,4
Allemagne	13,2	1,3
États-Unis	12,5	1,2
République tchèque	10,7	1,0
Pologne	9,16	0,90
Italie	5,27	0,50
Suisse	3,01	0,30
Autriche	5,51	0,24
France	2,38	0,23
Portugal	2,13	0,21
Royaume-Uni	2,13	0,20
Bulgarie	2,01	0,19
Slovénie	1,76	0,17

Les 15 pays énumérés au tableau 1.6 ont expédié 98,8 % des exportations totales de feux d'artifice en 2016. Parmi ces derniers, les exportateurs les plus dynamiques depuis 2012 sont la République tchèque (+ 978 %), le Portugal (+ 334 %), la Slovénie (+ 228 %) et la Suisse (+ 122 %). À l'inverse, quatre pays ont affiché une baisse de leurs ventes exportées, soit l'Allemagne (- 53 %), l'Italie (- 41 %), la Bulgarie (- 20 %), la France (- 16 %) et les États-Unis (- 15 %). (WTEx, 2017)

La Chine a le plus fort excédant dans le commerce international des feux d'artifice. C'est-à-dire qu'elle exporte un plus grand nombre d'articles qu'elle en importe, soit une valeur nette d'exportation de 907 M\$. Ce flux de trésorerie positif confirme une prédominance concurrentielle chinoise pour cette catégorie de produits. À l'inverse, les États-Unis ont enregistré le déficit le plus élevé dans cette même classe. Ce flux

négalif met alors en évidence le désavantage compétitif de ce pays, avec une valeur nette d'exportation de (-) 470 M\$ (WTEEx, 2017). Le tableau 1.7 présente les entreprises jouant un rôle majeur dans le commerce international des feux d'artifice.

Tableau 1.7 Entreprises engagées dans le commerce international des feux d'artifice (modifié de : WTEEx, 2017)

Entreprise	Pays
Brock's Fireworks Ltd	Royaume-Uni
Fantastic Fireworks	Royaume-Uni
Fireworks par Grucci	États-Unis
Göteborgs FyrverkeriFabrik	Suède
Kimbolton Fireworks	Royaume-Uni
Maravillas de Colombia SA	Colombie
Melrose Pyrotechnics	États-Unis
Pyro Spectaculars	États-Unis
Pyrotecnico	États-Unis
Reaction Fireworks	Royaume-Uni
Standard Fireworks	Inde
Star Fireworks	Royaume-Uni
Zambelli Fireworks	États-Unis

1.3.2 Grands producteurs

La Chine est le plus grand fabricant, exportateur et consommateur de feux d'artifice au monde, comptant pour environ 75 % de la production mondiale de pièces pyrotechniques. La majorité de ces articles proviennent de la ville de Liuyang, nommé la capitale mondiale du feu d'artifice (Planétoscope, 2016). Cette ville fournit près de 60 % des exportations pyrotechniques de la Chine et emploie plus de 400 000 ouvriers (Bluewin, 2015). Les Pays-Bas arrivent en deuxième position, suivie de l'Espagne, l'Allemagne et les États-Unis (WTEEx, 2017).

1.3.3 Évènements internationaux d'envergure

La création d'immenses évènements pyrotechniques est devenue au travers des années un symbole d'aisance et de prospérité pour les villes hôtes. Il ne s'agit pas seulement de produire un spectacle visuellement extraordinaire, mais bien d'attirer le regard du monde entier et de faire valoir sa ville sous son meilleur jour.

De ce fait, l'un des moments les plus symbolisés sur l'ensemble du globe est l'arrivée du Nouvel An. À Londres, non loin de 400 différents types de feux d'artifice sont employés afin de créer plus de

10 000 explosions. La durée du spectacle est d'environ 10 minutes et engendre des coûts de 2,9 M\$. Pour sa part, la ville de Sydney en Australie projette 11 000 bombes aériennes ainsi que 40 000 comètes et mines, pour une somme totale de 7 M\$. Ce prix est néanmoins compensé par les 130 M\$ injectés chaque année dans l'économie australienne dus à ce secteur d'activité. D'autant plus, Sydney est la première ville à accueillir la nouvelle année et les images de ses festivités sont les premières à paraître sur les chaînes télévisées du monde entier, d'où la pression de se distinguer. D'autre part, en janvier 2013, la ville de Dubaï a battu le record Guinness de la plus grande projection pyrotechnique avec 500 000 feux d'artifice propulsés de la tour Burj Khalifa en six minutes. La représentation a coûté 6,4 M\$, ce qui en fait l'écran le plus onéreux du globe (Townsend, 2014, 30 décembre). Le Nouvel An fêté à la tour 101 de Taipei à Taiwan et celui de Rio de Janeiro au Brésil sont aussi des spectacles aériens utilisant une énorme collection d'effectifs (IExplore, s. d.).

Plusieurs autres événements font également les manchettes, tels Thunder Over Louisville aux États-Unis. Ce dernier donne le coup d'envoi au Kentucky Derby Festival et plus de 56 000 bombes, soit une quantité équivalente à 60 t, ont été propulsées en 28 minutes lors de l'édition 2016 (Townsend, 2014, 30 décembre). Encore, la fête nationale du 14 juillet à Paris engendre en moyenne tous les ans des dépenses pyrotechniques de 515 000 \$ pour 35 minutes de représentation et emploie 3 t d'engins explosifs (Travère, 2017, 14 juillet). Dans la même lignée, il y a aussi le Festival international des feux d'artifice de Pohang en Corée du Sud, le Festival Katakai au Japon, le Festival international des feux de Malte, la fête nationale de Singapour ainsi que la fête nationale de l'Australie au port de Sydney (Brainjet, s. d.; IExplore, s. d.).

1.3.4 États-Unis

Selon l'*American Pyrotechnics Association* (APA), 93 % des feux d'artifice utilisés aux États-Unis sont fabriqués en Chine. Un rapport publié par le Bureau du recensement indique également que les Américains ont importé plus de 376 M\$ d'articles en 2016 contre seulement 12,5 M\$ en exportation (Vox, 2017).

Toutefois, depuis les 20 dernières années, l'industrie pyrotechnique américaine a expérimenté une hausse accrue d'activité. En effet, les revenus générés en 2016 par la vente de feux d'artifice à grand déploiement étaient de 433 M\$ comparativement à 177 M\$ en 1998. Le marché des pièces destinées aux consommateurs récolte quant à lui une retombée de 1,04 G\$ relativement à 356 M\$ en 1998. Qui plus est, près de 122 000 t de feux d'artifice ont été consommées l'année dernière, comptant 111 000 t d'articles disponibles en vente libre (APA, s. d.).

Le spectacle commémorant le Jour de l'Indépendance à New York (*Macy's Fireworks Show*) est l'évènement pyrotechnique le plus imposant de tout le pays. Lors de cette soirée, 12 900 t de feux d'artifice, soit 40 000 bombes, sont projetées dans le ciel. D'autant plus, 5 t de poudre noire sont utilisées comme charge propulsive. Les revenus engendrés par la vente de l'ensemble des articles explosifs suite à l'évènement totalisent un montant de 1,34 G\$. (Nelson, 2016, 4 juillet)

2. ENCADREMENT RÉGLEMENTAIRE

La législation fédérale, provinciale et municipale relative aux feux d'artifice est décrite dans ce chapitre. Elle permet de situer les pouvoirs et obligations des différents acteurs œuvrant dans le milieu.

2.1 Législation fédérale

Créé en 1994, RNCan est l'instance gouvernementale responsable d'encadrer le secteur des explosifs au Canada (RNCan, 2017a). Cette entité comprend la Division de la sécurité et de la sûreté des explosifs (DSSE) qui assure la sécurité du public et des travailleurs œuvrant dans l'industrie. Elle a pour mandat de faire appliquer la réglementation et d'instaurer de nouvelles avancées en matière de sûreté. Elle chapeaute la Division de la réglementation des explosifs (DRE), dont le rôle est de certifier la conformité à la législation pour ce qui est de la fabrication, l'importation, l'exportation, la vente et l'entreposage d'explosifs. Elle est aussi responsable d'administrer les licences et de déployer un programme d'inspection. D'un angle normatif, le secteur pyrotechnique canadien est régi par la Loi sur les explosifs (LE) et le Règlement de 2013 sur les explosifs (RE). (RNCan, 2003; RNCan 2017a)

2.1.1 Loi sur les explosifs

Dans sa définition, la LE stipule qu'un explosif est toute chose produite, fabriquée ou utilisée dans le but de déclencher une explosion, une détonation ou un effet pyrotechnique (*Loi sur les explosifs*). Elle prévoit, entre autres, qu'il est nécessaire de détenir une licence, un permis ou un certificat délivré par RNCan afin d'effectuer tout travail s'y rapportant. Elle relate les exceptions relatives à l'entreposage et l'utilisation de certains engins pyrotechniques peu dangereux et dicte les dispositions visant les pièces d'artifice et poudres propulsives. Elle précise aussi qu'un inspecteur de la DRE est en droit de visiter tout lieu où s'opèrent des activités liées à la vente, à la fabrication ou au stockage des feux d'artifice en vue de prélever des échantillons, d'exiger de la documentation contenant des renseignements utiles à la présente Loi ou d'examiner tout objet susceptible de servir à la fabrication, à l'emballage et à l'étiquetage d'un explosif. De plus, si celui-ci a des motifs de croire que les diverses manipulations s'effectuent dans des conditions qui contreviennent à la Loi, il peut apporter les correctifs nécessaires (*Loi sur les explosifs*). Toute personne interférant au travail de l'inspecteur perpètre un délit en vertu de la Loi et est passible d'une amende maximale de 5000 \$ ou d'un emprisonnement maximal de 6 mois (RNCan, 2009).

À priori, les pièces pyrotechniques à grand déploiement doivent être accompagnées d'un certificat d'autorisation émis par la DRE. L'ensemble du personnel doit aussi avoir reçu les formations requises afin

de manipuler et de transporter ce type d'articles. Plus de 16 500 Canadiens possèdent un permis leur permettant d'effectuer des démonstrations de feux d'artifice (Conseil canadien de la sécurité [CCS], s. d.).

L'entreposage d'une charge inférieure à 125 kilogrammes (kg) pour moins de 14 jours peut s'effectuer sans permis dans un lieu sécurisé et le transport d'une quantité nette d'explosifs inférieure à 10 kg ne nécessite pas l'apposition de signalisation sur le véhicule. Toutefois, en cas de poids excédentaire, la Loi sur le transport des marchandises dangereuses (LTMD) oblige l'affichage de panneaux indiquant le risque de dangerosité le plus élevé, tel que montré à la figure 2.1. Il est aussi important que l'aire de lancement se situe à plus de 30 m du public et que chacune des pièces soit inspectée individuellement. (GC, 2010)



Figure 2.1 Pictogramme pour le transport de feux d'artifice à haute portée (tiré de: Gouvernement du Québec [GQ], 2017)

Pour ce qui est des pièces pyrotechniques à usage des consommateurs, la législation mentionne les exigences devant être atteintes pour la vente, l'étalage, le stockage et le transport. De ce fait, un bâtiment d'entreposage peut contenir jusqu'à 1000 kg de pièces pyrotechniques, à défaut de quoi une licence de dépôt doit être émise par la DRE. Les articles en étalage doivent être divisés en lots de moins de 25 kg dans un endroit verrouillé afin d'éviter une propagation rapide des flammes en cas d'incendie. Le transport de ce type d'artifice est aussi régi par les directives de Transports Canada sur le transport de marchandise dangereuse ainsi que par la partie IV du RE. Ceux-ci stipulent que ces pièces explosives ne peuvent être transportées dans l'habitacle d'un véhicule et qu'un maximum de 75 kg peut être déplacé en présence de passagers. (RNCAN, 2009)

2.1.2 Règlement de 2013 sur les explosifs

Le RE porte sur les feux d'artifice privés et provient de la modification du Règlement sur les explosifs, changement nécessaire pour plusieurs raisons. Premièrement, les technologies et les produits visés par l'ancien règlement ont considérablement évolué avec les années et les différentes pratiques industrielles de l'époque n'existent plus. Deuxièmement, la mondialisation et la rationalisation de l'industrie ont eu des conséquences majeures en ce qui a trait à la perte d'experts et au nombre croissant de produits importés. De ce fait, l'industrie canadienne des explosifs a largement réduit ses effectifs et le personnel qualifié se raréfie. Les inspecteurs actuels ont alors souvent très peu d'expérience et la plupart d'entre eux n'ont

jamais travaillé dans le domaine (RNCAN, 2003). Troisièmement, l'accroissement des préoccupations en matière de sécurité a mené à un renforcement de la sûreté à court et à long terme, tant pour le public que pour les employés (*Règlement de 2013 sur les explosifs*).

Le Règlement précise que seules les pièces pyrotechniques autorisées peuvent être vendues au Canada et qu'il est illégal de les modifier ou d'en faire un usage dangereux. Selon l'article 21(1) de la LE, une personne faisant la vente elle-même ou par l'entremise d'autrui et qui contrevient au RE commet une infraction et, si trouvée coupable, reçoit une amende maximale de 250 000 \$ ou une détention d'un an dans le cas d'une procédure sommaire. Par la mise en accusation, une amende de 500 000 \$ ou une incarcération de cinq ans peut être sanctionnée. (RNCAN, 2009). Le tableau 2.1 présente les articles pyrotechniques interdits au Canada.

Tableau 2.1 Pièces pyrotechniques interdites au Canada (inspiré de: RNCAN, 2009)

Pièces interdites
Bombettes
Amorces à pression
Marrons d'argent
Marrons d'air M-80
Pétards éclair
Torpilles à jeter au sol
Charges pour cigarette
Allumettes truquées
Autres pièces truquées

Les propriétés et caractéristiques chimiques des pièces légalement fabriquées ou importées sont testées pour en vérifier leur conformité aux critères de sécurité et de fiabilité mis en place par l'inspecteur en chef des explosifs de la DRE (RNCAN, 2003; RNCAN, 2009). De ce fait, les composés phosphorés sont présents en quantité limitée en raison de leur caractère eutrophisant. Aussi, selon la Direction générale de la sécurité des explosifs de RNCAN, l'utilisation de produits chimiques toxiques comme l'arsenic (As), le plomb (Pb), le chrome (Cr), le mercure (Hg) et le phosphore (P) sont interdits dans la fabrication de feux d'artifice vendu sur l'ensemble du territoire canadien. Les perchlorates (ClO_4^-) (agents propulseurs) ont quant à eux récemment été mis en cause pour leur rôle dans le dysfonctionnement thyroïdien chez l'humain. Bien qu'aucune législation n'interdise cette substance, plusieurs manufacturiers les retirent volontairement de leurs procédés de fabrication (Sentinelle Outaouais, 2015).

2.1.3 Normes environnementales

Le gouvernement du Canada inscrit huit enjeux associés à la pollution atmosphérique, notamment les pluies acides, le smog, l'air transfrontalier, la couche d'ozone, les contaminants, les polluants, les métaux traces et les substances toxiques. Dans cette portée, l'instance fédérale a mis en place des indicateurs de qualité de l'air qui fournissent des renseignements sur les concentrations atmosphériques de cinq polluants : les matières particulaires (PM) de diamètre inférieur à 2,5 micromètres (μm) ($\text{PM}_{2,5}$), l'ozone (O_3) troposphérique, le dioxyde de soufre (SO_2), le dioxyde d'azote (NO_2) et les composés organiques volatils (COV). Ainsi, de nouvelles Normes canadiennes de qualité de l'air ambiant (NCQAA) ont été conçues afin de remplacer les standards pancanadiens pour les $\text{PM}_{2,5}$, l' O_3 et le SO_2 . Les normes pour le NO_2 et le SO_2 ne sont toutefois pas encore en vigueur et ne seront mises en place qu'en 2020.

Les NCQAA sont au centre du Système de gestion de la qualité de l'air (SGQA) mis en œuvre en 2012 par les gouvernements provinciaux, à l'exception de celui du Québec. Le Québec appuie les objectifs de ce système, mais ne l'applique pas en raison des obligations fédérales pour les émissions industrielles qui font double emploi avec le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA). Malgré cela, les normes canadiennes proposées font office de bases référentielles permettant l'étalonnage des mesures de $\text{PM}_{2,5}$, d' O_3 et de SO_2 recueillies dans le grand Montréal. (Ville de Montréal, 2016)

Parallèlement, l'*United States Environmental Protection Agency* (US EPA) a aussi établi des Normes nationales américaines de qualité de l'air ambiant (NAAQS) pour six contaminants, soit le monoxyde de carbone (CO), le Pb, le NO_2 , l' O_3 , les $\text{PM}_{2,5}$ et les PM de diamètre inférieur à 10 μm (PM_{10}) et le SO_2 . Ces polluants sont désignés en raison de leurs effets néfastes sur la santé et l'environnement ainsi que leur rôle dans la formation de dépôts acides. (US EPA, 2017)

D'autre part, la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE) fait la liste de 52 polluants contribuant, ou susceptibles de contribuer, aux problèmes de qualité de l'air et jugés toxiques au sens de la Loi. Parmi ceux-ci on retrouve notamment le Pb, l'As, le Cr hexavalent, le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le nickel (Ni), l' O_3 troposphérique, les oxydes d'azote (NO_x), le SO_2 , les PM_{10} , l'ammoniac (NH_3), les biphényles chlorés, les hexachlorobenzènes (HCB) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF). Les quantités limites pouvant être émises dans l'atmosphère n'y sont toutefois pas inscrites. (*Loi canadienne sur la protection de l'environnement*)

2.2 Législation provinciale

Les provinces ont chacune un pouvoir réglementaire quant aux activités pyrotechniques sur leurs territoires, mais doivent toutefois se conformer aux obligations législatives fédérales de la LE (RNCan, 2009). Au Québec, le cadre normatif entourant les feux d'artifice est régi par la Loi sur les explosifs provinciale (LEQ) ainsi que le Règlement d'application de la Loi sur les explosifs (RALE). La Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) et le RAA qui en découle présentent aussi quelques éléments pouvant se rattacher à ce domaine d'activité.

2.2.1 Loi sur les explosifs et Règlement d'application de la Loi sur les explosifs

La présente Loi prévoit un mécanisme de délivrance de permis afin de contrôler la possession d'explosifs sur le territoire et fixe des normes quant à l'usage, la commercialisation, la manutention et la conservation. Elle stipule que toute personne détenant des explosifs doit avoir un permis émis par un membre de la Sureté du Québec (*Loi sur les explosifs*). Ce permis exige que les sites soient nettoyés après chaque événement pyrotechnique, soit en ramassant les débris de bombes dès la fin du spectacle ainsi que le lendemain (Sentinelle Outaouais, 2015).

Dans son cas, le RALE indique les droits exigibles pour la délivrance d'un permis ainsi que les obligations reliées à la conservation, vente, transport et destruction d'articles explosifs. De ce fait, les articles pyrotechniques et la poudre noire doivent être entreposés dans un dépôt de catégorie IV fermé à clé et la charge totale ne doit pas dépasser 50 livres (lb). Si la période de remisage excède sept jours, le hangar doit alors être conforme aux normes de constructions précisées à l'annexe 6 du présent Règlement. De plus, toute personne transportant plus de 25 kg de pièces d'artifice doit être titulaire d'un permis et maintenir la cargaison sécurisée.

2.2.2 Normes environnementales

Le MDDELCC a instauré des normes de qualité de l'atmosphère pour l'ensemble du territoire québécois, prescrites à l'annexe K du RAA.

Ce règlement est issu de la LQE et stipule qu'il est interdit

« ...d'augmenter la production d'un bien ou d'un service s'il est susceptible d'en résulter une augmentation de la concentration dans l'atmosphère d'un contaminant mentionné à l'annexe K au-delà de la valeur limite prescrite pour ce contaminant [...] ou au-delà de la concentration d'un contaminant pour lequel cette valeur limite est déjà excédée. » (*Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*)

Les contaminants inscrits à l'annexe K du Règlement sont ainsi régulés par des normes de quantités seuils et de quantités limites de rejet atmosphérique. Cela dit, les normes et critères provinciaux sont conçus en vue d'évaluer les mesures de la qualité de l'air et d'étudier les projets susceptibles d'émettre des contaminants qui sont soumis pour autorisation au MDDELCC. Les critères présentés sont des seuils référentiels utilisés par le Ministère lors d'évaluation ou de délivrance d'acte administratif en vertu de la LQE. Par ailleurs, on désigne un seuil de référence par le terme « norme » lorsque celui-ci est inscrit dans le RAA. Les normes et critères ont été déterminés de manière à protéger la santé humaine et minimiser les préjudices aux écosystèmes. Ils sont établis à partir d'études et de corpus littéraires réalisés par des organismes tels que l'US EPA, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et Santé Canada. Une liste des contaminants émis pour lesquels aucune valeur de référence n'est disponible doit être fournie à la direction régionale du MDDELCC, afin d'établir la liste des substances à modéliser et les critères applicables (MDDELCC, 2010; *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*). Cependant, les feux d'artifice ne sont pas soumis à l'obligation de détenir une autorisation environnementale. Ce type d'évènement est géré au niveau de la municipalité, par l'obtention d'un permis.

D'autre part, l'OMS fournit dans ses rapports des lignes directrices relatives à la qualité de l'air destinées à être employées mondialement. Ils sont développés dans le but d'atteindre une qualité de l'air satisfaisante pour la protection de la santé publique et des milieux naturels. Les normes relatives à la qualité atmosphérique sont toutefois fixées par chacun des pays et représentent des composantes importantes de la gestion de risque et des politiques environnementales nationales. Autrement dit, les valeurs indicatives recommandées par l'OMS sont établies afin de réduire de manière significative les risques sanitaires associés à la pollution atmosphérique et doivent être interprétées comme des objectifs à atteindre. (OMS, 2006)

En résumé, le tableau 2.2 détaille les valeurs de références de CO, O₃, PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂ et NO₂ inscrites dans les NAAQS, les NCQAA, le RAA ainsi que les lignes directrices de l'OMS. De plus, le tableau 2.3 présente les normes et les critères d'émissions de certains métaux inscrits dans la législation provinciale en relation avec les valeurs suggérées dans l'OMS.

Tableau 2.2 Valeurs de référence pour six indicateurs de pollution atmosphérique (compilé d'après: Conseil canadien des ministres de l'Environnement [CCME], 2017; US EPA, 2017; *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*)

Contaminant	Période	NAAQS (µg/m³)	NCQAA (µg/m³)	RAA (µg/m³)	OMS (µg/m³)
NO ₂	1 h	188 (100 ppb)	113 (60 ppb)	414 (220 ppb)	200 (106 ppb)
	24 h				40 (21 ppb)
	1 an	100 (53 ppb)	32 (17 ppb)		
SO ₂	4 min			1050 (400 ppb)	500 (191 ppb)
	10 min				
	1 h	197 (75 ppb)	183 (70 ppb)		
	24 h			288 (110 ppb)	20 (8 ppb)
	1 an		13 (5 ppb)	52 (20 ppb)	
PM _{2,5}	24 h	35	28	30	25
	1 an	12			10
PM ₁₀	24 h	150			50
	1 an				
O ₃	1 h		126 (63 ppb)	160 (82 ppb)	
	8 h	140 (70 ppb)		125 (65 ppb)	100 (50 ppb)
CO	1 h	40 000 (35 ppm)		34 000 (30 ppm)	30 000 (25 ppm)
	8 h	10 300 (9 ppm)		12 700 (11 ppm)	10 000 (10 ppm)

Rouge: en vigueur en 2020

Tableau 2.3 Valeurs limites et lignes directrices pour certains métaux émis dans l'atmosphère (modifié de: MDDELCC, 2010)

Normes et critères québécois de qualité de l'atmosphère				OMS	
	Type	Valeurs limites (ug/m³)	Période	Lignes directrices (ug/m³)	Période
Sb	Norme	0,17	1 an	ND	
As	Norme	0,003	1 an	*	
Ba	Norme	0,05	1 an	ND	
Cd	Norme	0,036	1 an	0,005	1 an
Cr	Norme	0,004	1 an	*	
Cu	Norme	2,5	24 h	ND	
Hg	Norme	0,005	1 an	1,0	1 an
Ni	Norme	0,014	1 an	*	
Pb	Norme	0,1	1 an	0,5	1 an
Zn	Norme	2,5	24 h	ND	
V	Norme	1,0	1 an	1,0	24 h
Co	Critère	0,1	1 an	ND	
Mn	Critère	0,025	1 an	0,15	1 an
Ti	Critère	2,5	24 h	ND	

* Aucune mesure sécuritaire recommandable

2.3 Cadre municipal

Les villes et municipalités ont un pouvoir légal considérable en ce qui a trait à l'utilisation des feux d'artifice sur leur territoire. En effet, en adoptant un nouveau règlement local, elles peuvent interdire leur usage dans les aires privées et publiques, ajouter certaines précisions normatives, édicter des règles de sécurité minimales et créer des infractions en cas de contravention aux dispositions prévues.

Par exemple, la Ville de Québec a adopté en 2003 son Règlement sur les feux d'artifice, la pyrotechnie intérieure et les feux de joie indiquant que l'ignition d'articles pyrotechniques en vente libre est prohibée sur le domaine public de la ville, mais acceptée sur les terrains privés. Le site de lancement doit mesurer 30 m² et être complètement dégagé (*Règlement sur les feux d'artifice, la pyrotechnie intérieure et les feux de joie*). La Division de la gestion du territoire peut toutefois émettre une autorisation afin de déployer des pièces explosives sur un lieu commun. (Ville de Québec, 2017)

Néanmoins, plusieurs villes et municipalités interdisent complètement l'usage de feux d'artifice, sauf l'exception où un permis est octroyé à un maître-artificier. Ce dernier doit alors satisfaire à la LE et acquérir un certificat d'autorisation émis par le directeur du service de sécurité incendie local ou le conseil municipal. C'est le cas, entre autres, pour les villes de Blainville, Gatineau, Joliette, Montréal, Notre-Dame-des-Prairies, Saint-Charles-Borromée, Saint-Jérôme et Sainte-Thérèse (Labrie, 2011, 23 juin). Ces mesures ont vu le jour suite au nombre important de blessures chez les enfants et les adolescents (Ville de Joliette, 2016).

3. COMPOSÉS TOXIQUES RELÂCHÉS DANS L'ENVIRONNEMENT

Ce chapitre détaille les substances relâchées dans l'environnement suite à la déflagration d'artifices. À cet effet, des recherches scientifiques menées dans plusieurs pays sont présentées afin d'exposer la nature des particules en suspension, des métaux, des oxydes, des ions hydrosolubles et des composés organiques émis.

3.1 Particules en suspension

Les déflagrations de pièces pyrotechniques forment de larges écrans de fumée chargés de PM et de gaz, lesquelles constituent la principale source de pollution de ce secteur d'activité. Ces PM aéroportées sont majoritairement formées de métaux et de carbone élémentaire (C_e), mais recèlent également des composés secondaires comme les nitrates, sulfates, oxalates, malonates, succinates et glutamates (Sarkar, Khillare, Jyethi, Hasan et Parween, 2010). La nature complexe de cette émission peut avoir des impacts considérables sur la santé humaine, particulièrement lorsque les spectacles se déroulent dans des conditions atmosphériques stables (Vecchi et al., 2008). En effet, les PM_{10} et $PM_{2,5}$ peuvent être inhalées par les spectateurs et pénétrer profondément dans les poumons, provoquant des crises d'asthme aiguës et des éosinophilies pulmonaires (Sarkar et al., 2010). Par exemple, l'étude menée par Beig et al. en Inde indique une augmentation des cas de mortalité et de morbidité causée par l'exposition de la population aux concentrations de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} à moins de 3 km de la zone d'éclatement (Lin, 2016).

Cela dit, un large éventail d'ouvrages démontre la contribution des feux d'artifice à l'accroissement des concentrations de PM dans l'atmosphère. Le tableau 3.1 énumère les concentrations de PM ainsi que leur taux d'augmentation par rapport aux niveaux ambiants normaux de différents sites dans le monde.

Tableau 3.1 Concentration de PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale (modifié de : Lin, 2016)

Concentrations			Taux d'augmentation			Recherches	
PM _{2,5}	PM ₁₀	TSP	PM _{2,5}	PM ₁₀	TSP	Auteurs	Année
*	*	*	*	6	*	Smith	1975
18,5	*	*	10	*	*	Perry	1999
*	224	542	*	2	3	Ravindra et al.	2003
111	*	*	1,5	*	*	Drewnick et al.	2006
	93	*	*	8	*	Moreno et al.	2007
184	466	*	6	4	*	Wang et al.	2007
*	753	*	*	5,7	*	Barman et al.	2008
*	548	*	*	10	*	Tandon et al.	2008
*	64	*	*	5	*	Vecchi et al.	2008
150	*	*	2	*	*	Li et al.	2009
299	*	*	2,3	*	*	Shen et al.	2009
*	58	*	*	4	*	Camilleri et al.	2010
*	588	*	*	10	*	Sarkar et al.	2010
*	179	563	*	2	3	Singh et al.	2010
1200	2237	2322	34	22	12	Thakur et al.	2010
5000	*	*	500	*	*	Joly et al.	2010
*	*	682	*	*	3	Agrawal et al.	2011
250	429	*	10	10	*	Chang et al.	2011
*	*	623	*	*	2	Majumdar et al.	2011
*	767	*	*	3	*	Perrino et al.	2011
255	*	*	5	*	*	Feng et al.	2012
85	143	*	1,7	3	*	Huang et al.	2012
*	514	*	*	5	*	Mandal et al.	2012
*	118	*	*	2	*	Nishanth et al.	2012
271	930	*	2	4	*	Rao et al.	2012
495	615	*	4	5	*	Tiwari et al.	2012
113	155	*	2,1	1,8	*	Tsai et al.	2012
*	431	*	*	4	*	Ambade et al.	2013
2200	2700	*	15	14	*	Beig et al.	2013
*	711	*	*	5	*	Chatterjee et al.	2013
183	*	*	3,7	*	*	Li et al.	2013
395	555	*	2,9	2,6	*	Nirmalkar et al.	2013
*	*	331	*	*	2	Pachauri et al.	2013
*	41	*	*	2	*	Deka et al.	2014
100	*	*	2	*	*	Jiang et al.	2014
437	572	*	15	14	*	Lin et al.	2014
250	350	*	5	3	*	Shi et al.	2014
165	249	*	2	1,9	*	Tian et al.	2014
464	*	*	14	*	*	Yang et al.	2014
113	*	*	2,3	*	*	Kong et al.	2014
160	166	*	5,7	5,3	*	Pathak et al.	2015

*Donnée non répertoriée

L'accroissement des PM semble être fortement influencée par les conditions locales, soit la proximité entre les sites de mesures et les aires de lancement, l'intensité et la quantité des pièces pyrotechniques utilisées, la pollution atmosphérique locale ainsi que les facteurs météorologiques (Joly et al., 2010; Perry, 1999; Vecchi et al., 2008). Dans ce sens, l'étude menée par Joly et al. au cours d'une représentation de l'International des Feux Loto-Québec à Montréal a signalé une concentration de $PM_{2,5}$ égale à $10\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit 1000 fois supérieures aux valeurs enregistrées les jours précédents, et bien plus hautes que celles habituellement mesurées lors d'épisode de smog ($\sim 80\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). La même étude démontre que les niveaux d'exposition relevés sur 1 heure (h) pour des feux de même intensité dans la ville pouvaient atteindre 50 fois la concentration horaire moyenne urbaine ($< 20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) et plus de 10 fois la concentration horaire maximale ($\sim 120\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Qui plus est, les quantités élevées de $PM_{2,5}$ prélevées à moins de deux km du lieu de lancement ont rapidement chuté vers les valeurs de fond, mais une aire de surveillance située à 14 km du site a tout de même enregistré des données cinq fois supérieures à la concentration horaire moyenne annuelle en milieu urbain ($\sim 10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Joly et al., 2010). Ce phénomène démontre que les PM émises dans l'air parcourent une distance importante dans l'axe du vent.

D'ailleurs, le responsable du Réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal a confirmé que « les pires indices de qualité de l'air jamais enregistrés l'ont été des soirs de feux » (Cameron, 2008, 19 juillet). Aux faits de ces observations, la Direction de la santé publique de Montréal a voulu enquêter sur les impacts sanitaires des $PM_{2,5}$ émises, mais aucun financement n'a été accordé. Toutefois, en 2002, la directrice de l'International des feux Loto-Québec a stipulé qu'« à la demande de la Direction de la santé publique, les spectateurs sur le site sont maintenant avertis par le maître de cérémonie que la fumée pourrait les incommoder » (Cameron, 2008, 19 juillet).

D'autre part, la figure 3.1 présente les concentrations médianes et les taux d'augmentation de PM évalués dans trois zones géographiques distinctes lors de différentes fêtes, soit l'Inde, la Chine et Taiwan puis l'occident (Europe et Amérique du Nord). Selon ces données, l'Inde enregistre les plus hautes concentrations de $PM_{2,5}$ et PM_{10} avec des valeurs de $101\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $119\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement, suivie de la Chine et Taiwan ($54\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $83\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) et de l'occident ($12\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $14\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Bien que les taux d'augmentation soient plus faibles en Inde ($4,2\ \mu\text{g}/\text{m}^3\ PM_{2,5}$ et $4,6\ \mu\text{g}/\text{m}^3\ PM_{10}$) que dans les pays occidentaux ($9,1\ \mu\text{g}/\text{m}^3\ PM_{2,5}$ et $5,4\ \mu\text{g}/\text{m}^3\ PM_{10}$), la hausse absolue des concentrations de PM attribuable

aux célébrations indiennes est beaucoup plus élevée, démontrant ainsi l'importance d'instaurer des mesures régionales de contrôle dans ce pays.

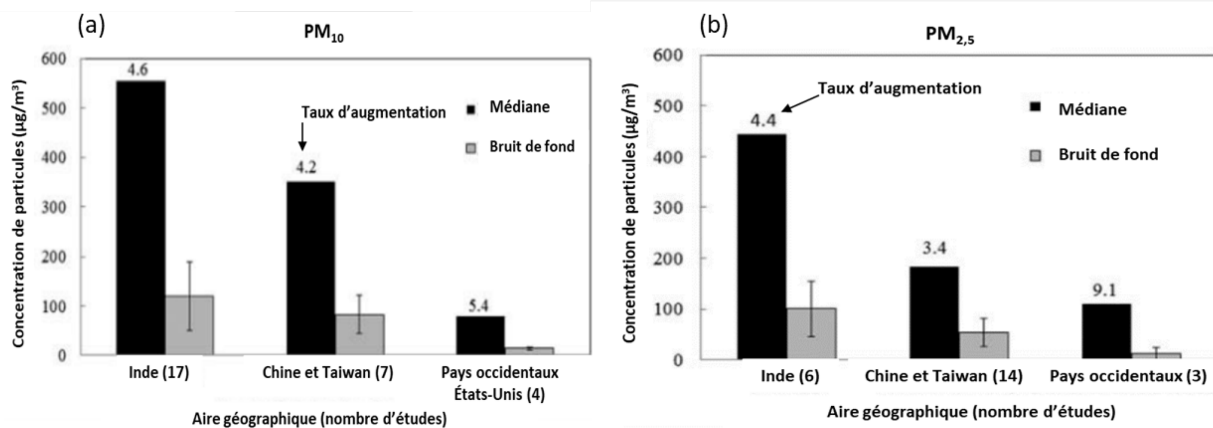


Figure 3.1 Répartition géographique des concentrations de PM mesurées lors d'événements pyrotechniques (a) $PM_{2.5}$ (b) PM_{10} (modifié de : Lin, 2016)

Enfin, les PM peuvent demeurer en suspension dans l'air pendant plus d'une semaine, voir même un mois, et donner lieu à des concentrations élevées sur une période de temps prolongée (Lin, 2016; Ravindra, Mor et Kaushik, 2003; Sarkar et al., 2010). Aussi, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ augmente considérablement sous l'effet de la libération d'une grande quantité de PM fines et ultrafines (100 à 500 nm), exacerbant du même coup leur toxicité et les préoccupations de santé publique à court terme (Lin, 2016; Moreno et al., 2007; Vecchi et al., 2008; Wang, Zhuang, Xu et An, 2007).

3.2 Métaux et métalloïdes

L'accumulation de métaux dans l'environnement affecte négativement la santé humaine et perturbe l'équilibre naturel des écosystèmes déjà précaires. Malgré leurs rôles essentiels dans le fonctionnement biologique de tout organisme vivant, certains d'entre eux peuvent générer des effets toxiques lorsqu'emmagasinés en trop grande concentration dans les tissus (Reis, Pardo, Camargos et Oba, 2010). Par exemple, les éléments Cd, Co, Cr, Ni, Pb et Se sont des cancérrogènes pouvant induire des méfaits neurologiques, hématologiques et respiratoires, et ce même à l'état de traces (Barman, Singh, Negi et Bhargava, 2008).

Plusieurs sources anthropiques rejettent ces éléments et s'associent à cette surcharge : les combustibles fossiles entraînent l'émission de K, Al, Mg, Fe, Na, Hg, Ca, Cd, Pb, Sc et As, la combustion du bois occasionne le relargage de Pb et de Zn, le transport routier contribue à l'émission de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn et les fonderies dissipent un large éventail de substances particulières dont le Cd, Cr, Al, Fe, Ni, Zn, Pb, Cu, etc.

(Aksu, 2015; Furismky, 2000). Les feux d'artifice, par leur composition chimique riche en métaux, constituent également un risque d'émission non négligeable. Effectivement, dans un rapport produit par le *Department for Environment, Food and Rural Affairs* (DEFRA) au Royaume-Uni, il est estimé qu'environ 73 t de Mg, 65 t de Ba, 10 t de Sr, 5 t de Ti et 3 t de Cu ont été larguées dans l'environnement suite aux activités pyrotechniques récréatives en 2002. Cela représente respectivement 6 % et 7,6 % des émissions de Cu et Mg dans ce pays en 2000 (Moreno et al., 2007).

Dans ce sens, plus de 25 articles scientifiques signalent une hausse significative des concentrations de métaux et de métalloïdes dans les PM lors de la combustion de pièces d'artifice. La majorité de ces textes affirment que les feux contribuent à l'élévation des concentrations de PM métalliques inhalables ($< PM_{10}$) dans l'atmosphère et que ces dernières sont susceptibles de se retrouver dans l'environnement à des valeurs bien au-dessus de leurs plages normales. D'autres métaux rarement signalés se voient aussi augmenter, comme le Co, V, Ti, Ni, Hg, Bi, Ga et Sb. Le tableau 3.2 énumère les concentrations de métaux ainsi que leur taux d'augmentation mesuré dans le cadre de diverses recherches menées à travers le monde.

Tableau 3.2 Concentration de métaux ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale (compilé d'après : Barman et al., 2007; Do et al., 2012; Godri et al., 2010; Joly et al., 2010; Kulshrestha et al., 2004; Licudine et al., 2012; Lin, 2016; Lin et al., 2013; Moreno et al., 2007; Perry, 1999; Pervez et al., 2016; Sarkar et al., 2010; Thakur et al., 2010; Tsai et al., 2012; Vecchi et al., 2008; Wang et al., 2007)

Recherches	Perry 1999 <i>PM_{2,5}</i>	Kulshrestha et al. 2004 <i>PM₁₀</i>	Barman et al. 2007 <i>PM₁₀</i>	Moreno et al. 2007 <i>PM₁₀</i>	Wang et al. 2007 <i>PM_{2,5}</i>	Tandon et al. 2008 <i>PM₁₀</i>	Vecchi et al. 2008 <i>PM₁₀</i>	Camilieri et al. 2010 <i>PM₁₀</i>	Godri et al. 2010 <i>PM₁₀</i>
K	0,88 (18)	58,00 (25)	*	3,80 (7,6)	50,00 (22)	3,58 (24)	0,99 (6,8)	*	1,30 (60)
Fe	0,030 (3)	1,20 (2)	0,75 (1,7)	0,40 (1,3)	5,00 (3)	0,34 (4)	1,70 (2,8)	*	0,15 (-)
Zn	0,008 (2)	0,51	0,54 (2,2)	0,08 (-)	3,00 (5)	0,59 (3)	0,19 (3,4)	*	0,04 (-)
Pb	0,008 (4)	0,31	0,31 (1,4)	0,25 (14,5)	1,10 (8)	0,13 (1)	0,06 (3,7)	*	0,01 (10)
Mn	0,003 (3,5)	0,08 (2)	0,08 (1,3)	*	0,40 (4)	0,02 (5)	0,03 (3)	*	*
Cu	0,004 (5)	0,45 (9)	0,45 (3,7)	0,06 (5)	0,60 (6)	0,02 (14)	0,11 (4,6)	0,01 (2,8)	0,13 (-)
Cd	*	*	0,05 (2,0)	0,001 (2)	*	0,002 (10)	*	*	*
Cr	*	0,04	0,04 (2,2)	0,003 (6,5)	*	0,00 (5)	0,01 (2,9)	*	*
Ba	0,03 (350)	15,00 (1 091)	*	0,24 (6,1)	4,50 (82)	0,54 (2)	0,16 (9,3)	0,03 (5,00)	0,11 (22)
Al	0,09 (6)	35,00 (18)	*	1,50 (2,1)	10,00 (6)	0,69 (58)	0,68 (11,4)	0,41 (3,80)	*
Mg	0,04 (42)	2,30 (6)	*	0,30 (3)	6,00 (8)	0,21 (25)	0,60 (11,4)	*	0,05 (10,0)
Sr	0,01 (200)	0,58 (15)	*	0,03 (10)	0,80 (17)	0,02 (8)	0,14 (56)	0,013 (2,7)	0,04 (18)

Recherches	Joly et al. 2010 <i>PM_{2,5}</i>	Perrino et al. 2010 <i>PM₁₀</i>	Sarkar et al. 2010 <i>PM₁₀</i>	Thakur et al. 2010 <i>PM₁₀</i>	Chang et al. 2011 <i>PM₁₀</i>	Crespo et al. 2012 <i>PM₁₀</i>	Do et al. 2012 <i>PM₁₀</i>	Feng et al. 2012 <i>PM₁₀</i>	Huang et al. 2012 <i>PM₁₀</i>
K	5 000 (50)	68,00 (11)	46,80 (18)	*	38,0 (111)	*	1,25 (2,4)	*	1,80
Fe	20 (5)	4,60 (1)	6,30 (-)	*	1,6 (5)	275 (7,1)	0,41 (2,3)	2,50 (-)	1,93
Zn	50 (5)	1,60 (4)	0,82 (-)	*	0,8 (5)	0,44 (25,9)	0,34 (10)	0,60 (7,0)	0,50
Pb	20 (25)	0,66 (2)	0,36 (-)	104 (15)	1,6 (29)	1,37 (105,4)	0,11 (5,2)	1,40 (12,0)	0,11
Mn	*	0,19 (3)	0,93 (3)	*	0,24 (11)	0,11 (12,2)	0,11 (8,8)	0,20	0,07
Cu	30 (6)	0,11 (11)	0,55 (-)	158 (79)	0,55 (5)	2,38 (108,0)	0,06 (9,3)	0,58 (12)	0,07
Cd	*	*	*	1 (17)	*	*	*	*	0,00
Cr	3 (3)	0,09 (-)	0,29 (-)	*	*	*	0,03 (20)	(2,5)	0,02
Ba	80 (40)	11,00 (20)	16,80 (264)	624	0,98 (9)	8,18 (136)	1,45 (7,8)	8,00 (50,0)	0,14
Al	6 000 (1 000)	18,00 (3)	38,40 (3,2)	0,001 (6)	4,5 (23)	*	0,46 (1,3)	15,00 (7,0)	2,51
Mg	1 (1)	6,30 (5)	21,30 (5,8)	*	3,5 (18)	9,36 (18,1)	0,12 (0,5)	6,00 (7)	0,82
Sr	3 000 (60)	1,80 (50)	0,14 (15)	*	0,45 (76)	6,33 (466)	0,73 (62,7)	1,80 (50)	0,06

Recherches	Licudine et al. 2012 <i>PM₁₀</i>	Tsai et al. 2012 <i>PM_{2,5}</i>	Ambade et al. 2013 <i>PM₁₀</i>	Chatterjee et al. 2013 <i>PM₁₀</i>	Lin et al. 2013 <i>PM_{2,5}</i> <i>PM₁₀</i>		Deka et al. 2014 <i>PM₁₀</i>	Kong et al. 2015 <i>PM_{2,5}</i>	Pervez et al. 2016 <i>PM_{2,5}</i>
K	61,02 (94)	13,80 (20,0)	*	*	88,64 (7 202)	98,81 (838)	*	14,34 (9,3)	66 (37,0)
Fe	0,61 (2)	2,13 (1,3)	0,90 (4,5)	6 700 (26)	0,63	1,71	2,35 (2)	0,30 (1,8)	6 (8,5)
Zn	0,58 (18)	2,59 (2)	0,88 (4,0)	2 200 (6)	1,25	1,41	*	0,24 (2)	20 (16)
Pb	0,25 (158)	1,11 (9,3)	0,50 (3,2)	1 800 (11)	1,15 (98)	1,20 (126)	0,01 (26)	0,43 (2,6)	5 (7,9)
Mn	0,09 (15)	*	0,10 (7)	490 (40)	0,11	0,15	0,08 (1)	0,05 (1,9)	18 (7,5)
Cu	6,70 (49)	0,17 (4,3)	0,50 (1)	70 (25)	1,42 (473)	1,61 (676)	0,03 (8)	0,17 (1,3)	18 (13,7)
Cd	0,002 (16)	0,02 (-)	0,05 (1)	25 (12)	*	*	*	*	*
Cr	0,16 (14)	0,49 (2)	*	*	0,06	0,07	0,22 (8)	0,02 (3)	1 (2,1)
Ba	0,50 (7)	1,32 (4,4)	*	*	3,81 (1 828)	4,60 (3 036)	*	0,85 (99,1)	*
Al	7,30 (9)	3,22 (3,2)	*	900 (6,0)	7,60 (121)	11,00 (190)	*	3,13 (7,9)	156 (9,5)
Mg	18,41 (9)	19,31 (26,1)	*	*	7,37 (104)	9,66 (594)	*	0,20 (2,6)	30 (19)
Sr	1,72 (215)	0,39 (9,8)	*	*	1,47 (534)	1,60 (550)	*	0,18 (79,4)	*

Note. Le rapport des concentrations après et avant les épisodes de feux d'artifice est entre parenthèses.

* Donnée non répertoriée

(-) Diminution de la concentration pendant un feu d'artifice.

L'étude du corpus littéraire démontre en corolaire que les concentrations de K, Mn, Ba, Al et Mg s'élèvent considérablement pendant les présentations et que les taux d'augmentation accrus du K, Ba et Sr sous-entendent leur efficacité comme indicateur d'activités pyrotechniques. Également, la plupart des recherches enregistrent des valeurs de Cu, Zn, Pb, Cd, Cr et Fe supérieures à celles préalablement mesurées ainsi que, dans une moindre mesure, des enrichissements de Co, V, Ti, Ni, Hg, Bi, Ga, Sb, Na et Ca. (Barman, Singh, Negi et Bhargava, 2008; Joly et al., 2010; Kulshrestha, Rao, Azhaguvel et Kulshrestha, 2004; Lin, 2016; Perry, 1999 ; Thakur, Charkraborty, Charkraborty et Srivastava, 2010).

Par exemple, l'étude menée par Kulshrestha et al. relève une hausse significative de certains métaux dans l'atmosphère lors du festival de Diwali en Inde, le plus grand évènement pyrotechnique du pays. Les concentrations enregistrées sont présentées à la figure 3.2 et vont de l'ordre suivant : $K > Al > Ba > Mg > Fe > Sr > Na > Ca > Cu > Mn > As > V > Ni > Bi$ (Kulshrestha et al., 2004).

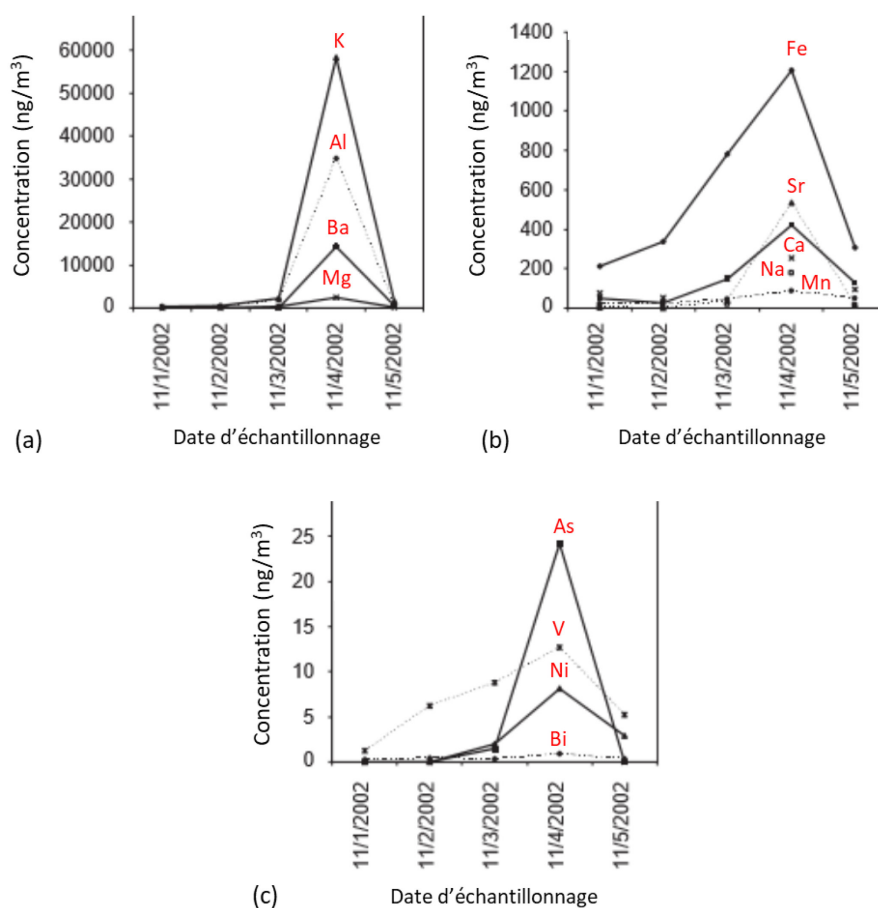


Figure 3.2 Variations des concentrations de métaux durant le festival de Diwali en Inde (a) Al, Ba, K et Mg (b) Fe, Sr, Cu, Na, Ca et Mn (c) Bi, Ni, As et V (modifié de : Kulshrestha et al., 2004)

Le 4 novembre 2002, une élévation accrue de la concentration des métaux fait suite à la déflagration d'une énorme quantité de feux. Les concentrations de Ba, K, Al, As, Sr, Cu, Mg, Ni et V augmentent ainsi de 1091, 25, 18, 16, 15, 9, 6, 4 et 1,5 fois respectivement, tandis que le Bi et Na d'un facteur de 3 et le Ca, Fe et Mn d'un facteur de 2. Toutefois, la forte diminution observée au cours des 24 h suivantes suggère que leur temps de résidence est très court et qu'ils se déposent rapidement au sol. (Kulshrestha et al., 2004)

Une seconde étude dirigée par Li et al. porte sur l'émission atmosphérique de PM enrichies en métaux suite aux célébrations du Nouvel An en Chine. La figure 3.3 montre en (a) une image générée par microscope à transmission électronique (MET) d'une PM_{2,5} constituée d'amas métalliques et en (b) la composition chimique de PM_{2,5} mesurées avant, pendant et après le Nouvel An chinois (Li et al., 2013). En somme, les particules recueillies en absence d'activité pyrotechnique affichent un profil très similaire avec une teneur élevée en soufre et minéraux, alors que celles prélevées au moment des célébrations exhibaient un enrichissement marqué de Mg, K, Ba, Al et Fe. (Li et al., 2013)

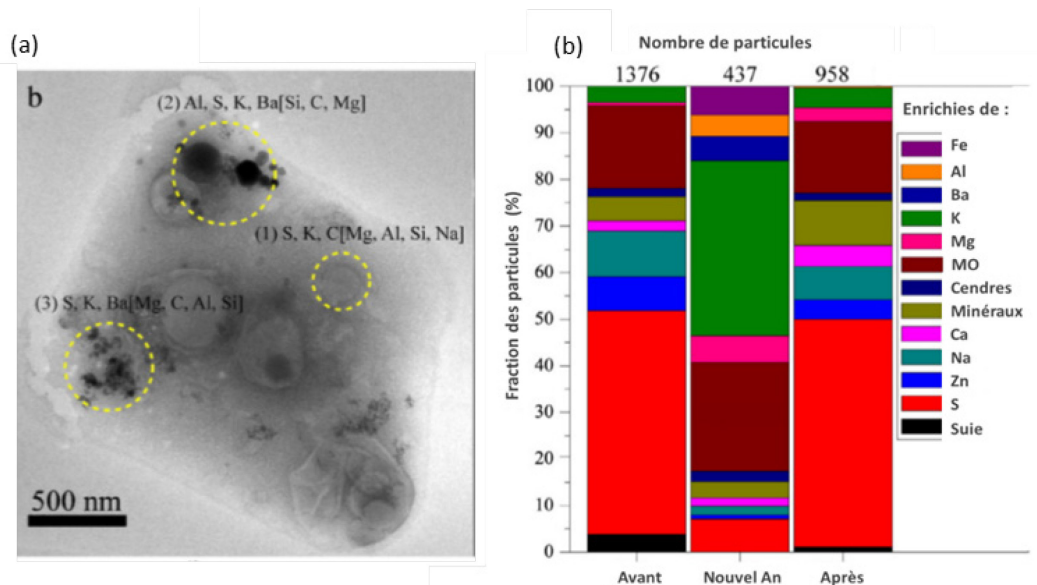


Figure 3.3 Caractérisation de PM_{2,5} prélevées durant le Nouvel An en Chine (a) Image MET d'une PM_{2,5} (b) Fractions chimiques des PM_{2,5} prélevées avant, pendant et après l'évènement (tiré de : Li et al., 2013)

D'autre part, la recherche conduite par Steinhauser et al. pendant le Nouvel An autrichien montre une hausse importante des concentrations de Ba et Sr dans les neiges de Viennes (580 fois pour Ba et 6,6 fois pour Sr). Puisque le Ba (NO₃)₂ est utilisé pour provoquer l'émission des couleurs vertes, blanches et jaunes, il est prévisible qu'une plus grande quantité de Ba retombent suite à la déflagration d'un bouquet multicolore, contrairement au Sr qui n'est utilisé que pour le rouge (Alenfelt, 2000). Par conséquent,

l'étude propose que le principal indicateur pour la détection de combustibles pyrotechniques dans les précipitations soit le Ba. (Steinhauser, Tarantik et Klapötke, 2008)

3.3 Oxydes

En plus de l'émission de particules et de métaux, l'explosion de pièces d'artifice relâche une grande quantité de gaz dans l'air, plus particulièrement le SO₂ et les NO_x. Ces molécules sont formées lors de la décomposition thermique de la poudre noire, tel qu'indiqué à la figure 1.3 du chapitre 1.

Le SO₂ est un polluant atmosphérique majeur produit par diverses activités, notamment le brulage de combustibles fossiles, les éruptions volcaniques et la combustion de biomasses. Ce gaz devient particulièrement dangereux lorsqu'il est en présence de PM, car il s'adsorbe lentement à leur surface et est transporté profondément dans les voies respiratoires. Il peut ainsi causer de graves dommages pulmonaires en raison de son caractère acide et de son temps de résidence élevé. Le NO₂ provoque aussi une intense irritation des bronches avec lésions tissulaires, en plus d'altérer les fonctions biochimiques (Ravindra et al., 2003).

Plusieurs recherches indiquent un accroissement significatif de ces gaz lors de différents événements et sont montrées au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Concentrations de PM, SO₂, NO_x et O₃ (µg/m³) lors d'événements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale (compilé d'après : Barman et al., 2007; Ravindra et al., 2003; Singh et al., 2010; Thakur et al., 2010; Yerramsetti et al., 2013)

Recherches	Ravindra et al. 2003	Barman et al. 2007	Singh et al. 2010						Thakur et al. 2010	Yerramsetti et al. ^a 2013		
Date d'expérimentation	1999	2005	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2007	2009	2010	2011
TSP	455,6 (1,3)	*	472,9 (1,5)	383,5 (1,4)	532 (1,5)	242,5 (1,2)	295,0 (1,8)	563,0 (1,5)	*	*	*	*
PM ₁₀	174,4 (1,3)	753,3 (5,7)	298,6 (2,4)	237,0 (2,1)	323,5 (2,3)	206,5 (2,4)	255,0 (2,7)	368,0 (2,3)	2 237,2 (7,6)	*	*	*
PM _{2,5}	*	*	*	*	*	*	*	*	1 199,7 (5,4)	*	*	*
SO ₂	23,5 (2,0)	139,1 (6,6)	53,3 (5,3)	33,8 (5,6)	63,5 (5,3)	29,0 (5,8)	38,0 (4,8)	75,0 (4,7)	12,3 (1,7)	27,2	30,4	29,9
NO _x	24,4 (1,3)	91,6 ^a (2,7)	61,3 (2,5)	50,5 (1,7)	80,0 (2,3)	41,2 (2,3)	53,0 (2,5)	90 ^a (3,2)	97,5 (1,3)	19,7 133%	15,0 15%	12,8 17%
S/N	1,0	1,5	0,9	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,1	1,0	1,5	1,7
O ₃	*	*	*	*	*	*	*	*	*	52,0 63%	26,0 4%	50,0 37%
Temps de mesure	24 h	24 h	24 h						24 h	14 h ^b		

^aDonnée non répertoriée

^aTaux d'augmentation en pourcentage

^bMesure prise la nuit

Au cours du festival de Diwali de 2002 à 2007, Singh et al. signalent des augmentations respectives de deux à six fois les valeurs initiales de SO₂ et NO₂. Les niveaux de NO₂ étaient alors deux à quatre fois plus élevés que ceux des sites industriels. (Singh et al., 2010)

Yerramsetti et al. ont aussi étudié les rejets produits par cet événement durant trois années consécutives. De 2009 à 2011, ils mesurent une augmentation d'O₃ troposphérique, de NO_x et de SO₂. L'O₃ présent en

basse altitude est un polluant atmosphérique secondaire formé par un ensemble de réactions photochimiques impliquant les NO_x et les COV. Dans la troposphère, l' O_3 est généralement produit par la photolyse du NO_2 sous l'effet du rayonnement solaire. Sa formation est donc impossible en absence de lumière et d'activités photochimiques induites. Toutefois, l'étude montre une augmentation moyenne de 57 % d' O_3 au moment du festival, plus particulièrement à la tombée du jour (Yerramsetti, Sharma, Navlur et Rapolu, 2013). Ce phénomène est constaté dans les textes d'Attri et al. et de Nishanth et al. Ce dernier avance que la formation d' O_3 nocturne est causée par la photolyse du NO_2 vers 420 nm, une des longueurs d'onde émise au cours de la combustion d'artifices (Nishanth, Satheesh Kumar et Valsaraj, 2012).

D'autre part, Yerramsetti et al. obtiennent un ratio SO_2/NO_x (S/N) égal à 2,76. Ce ratio fait fonction d'indicateur d'activités pyrotechniques et une valeur plus élevée que 0,48 confirme la présence d'émissions anthropiques riches en S. Des quantités soutenues de NO_2 , SO_2 et O_3 sont mesurées plusieurs heures après les festivités, suggérant que plus d'une journée est requise afin qu'ils s'éliminent de l'atmosphère par voies réactionnelles. Cela dit, les variations de concentrations sont fortement influencées par les conditions météorologiques locales, tels les inversions de températures, le smog, la hauteur moyenne de la couche de mélange, etc. (Yerramsetti et al., 2013)

3.4 Ions hydrosolubles

Plusieurs études notent des concentrations élevées d'ions hydrosolubles (IH) dans les particules d'aérosol pendant et peu après les projections. Ces ions, tels le sulfate (SO_4^{2-}), le NO_3^- et l'ion ammonium (NH_4^+), contribuent à plus de 50 % de la masse totale des $\text{PM}_{2,5}$ et leur abondance a une influence critique sur l'hygroscopicité des particules atmosphériques (Tang, Fung, Imre et Munkelwitz, 1995; Yang et al., 2014). Leur capacité à absorber l'eau à des conditions de forte humidité relative peut ainsi exacerber la diminution de visibilité lors des explosions (Lee, Yan, Chang et Yuan, 2005; Yuan, Lee, Liu, Chang, Yuan et Yang, 2006).

Les espèces SO_4^{2-} et NO_3^- résultent de taux d'oxydation plus élevés des gaz SO_2 et NO_x , tandis que les ions K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Ca^{2+} et Na^+ proviennent des composés utilisés dans la confection des feux d'artifice. Le tableau 3.4 montre les concentrations d'IH ainsi que leur taux d'augmentation par rapport aux concentrations normalement présentes. Les données affichées ont été récoltées par des groupes de recherches ayant œuvré dans plusieurs pays de 2006 à 2014, dont la Chine, l'Inde, l'Espagne, l'Italie et l'Allemagne.

Tableau 3.4 Concentration d'IH lors d'évènements pyrotechniques et leur taux d'augmentation par rapport à une journée normale (modifié de : Lin, 2016)

K^+	Mg^{2+}	Cl^-	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Recherches Auteurs Année
33,2 (43,6)	*	5,1 (9,6)	*	36,2 (9,4)	6,5 (1,6)	2,4 (1)	Drewnick et al. 2006
*	*	*	*	7,5 (1,1)	*	2,0 (-)	Moreno et al. 2007
30,0 (15)	2,0 (4)	21,0 (10)	2,5 (1,9)	75,0 (7,5)	30,0 (10)	6,0 (6)	Wang et al. 2007
*	*	*	*	3,6 (7)	4,5 (5,2)	1,6 (1,5)	Vecchi et al. 2008
14,7	1,4	8,3	0,8	30,2	59,9	21,1	Shen et al. 2009
46,5 (56)	2,6 (31)	19,4 (20)	1,4 (3)	28,0 (2)	2,5 (-)	2,6 (-)	Chang et al. 2011
*	5,7	14,0 (9,3)	7,9 (1)	49,0 (6,7)	20,0 (4)	1,3 (2,5)	Perrino et al. 2011
1,4 (3,6)	0,7 (2,2)	4,2 (2,5)	3,1 (3,6)	22,5 (4,2)	28,7 (7,9)	15,3 (5,9)	Tsai et al. 2012
26,0 (4,7)	29,6 (4,2)	14,0 (3,5)	12,5 (2,6)	19,9 (2,5)	16,0 (3,2)	16,8 (3,1)	Rao et al. 2012
81,2 (71,4)	*	51,7 (56,6)	*	59,6 (12,5)	15,0 (2,3)	5,0 (2,1)	Feng et al. 2012
*	*	*	*	5,3 (2,1)	7,2 (2,9)	5,5 (2,2)	Huang et al. 2012
14,0 (1,8)	14,0 (2,3)	11,0 (3,7)	13,0 (2,6)	15,0 (2,5)	19,0 (2,5)	14,0 (2)	Ambade et al. 2013
85,0 (30)	8,0 (20)	38,0 (5,4)	15,0 (14)	125,0 (12)	30,0 (3)	*	Chatterjee et al. 2013
15,6 (5,4)	8,9 (4,2)	11,1 (1,4)	3,8 (-)	17,8 (2)	16,3 (2,1)	4,5 (2,8)	Pachauri et al. 2013
*	*	*	*	2,5 (1,1)	0,7 (-)	0,5 (-)	Jiang et al. 2014
6,0	2,5	0,2	*	0,8	*	*	Tian et al. 2014
123,7 (33)	6,7 (20,8)	74,5 (12)	1,1 (1,4)	86,9 (3,9)	14,6 (-)	7,3 (-)	Yang et al. 2014
4,8 (9,8)	0,1 (3,3)	3,0 (2,6)	0,3 (2,8)	16,1 (4,7)	14,6 (2,5)	10,5 (2,5)	Kong et al. 2014
5,9 (6,9)	*	2,7 (3,2)	*	35,0 (1,7)	25,0 (1,5)	17,0 (1,5)	Cheng et al. 2014
0,2 (1,4)	5,1 (1)	6,3 (1)	1,3 (1,1)	8,1 (1,1)	0,8 (1,4)	1,1 (-)	Deka et al. 2014

Note. Le rapport des concentrations après et avant les épisodes de feux d'artifice est entre parenthèses.

* Donnée non répertoriée

(-) Diminution de la concentration pendant un feu d'artifice

Ces études signalent des concentrations accrues d'IH ainsi que des taux s'élevant jusqu'à 56 fois les valeurs de fond. Les espèces montrant une forte hausse de concentration sont le K^+ , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} ainsi que, à un degré moindre, les ions Ca^{2+} et Na^+ . À cet effet, les recherches menées par Feng et al. indiquent des taux d'augmentation de 71,4, 56,6, 23,9 et 12,5 pour les ions K^+ , Cl^- , Mg^{2+} et SO_4^{2-} alors qu'ils n'étaient que de 2,3, 2,1 et 0,9 pour le NO_3^- , NH_4^+ et Ca^{2+} . Cela dit, plusieurs études avancent que la présence de K^+ ainsi que la mesure de rapports élevés de Cl^-/Na^+ et inférieurs de Cl^-/K^+ sont des indicateurs fiables pour la détection de PM générés par les feux d'artifice (Lin, 2016; Lin et al., 2014; Tsai, Lin, Yao et Chiang, 2012; Wang et al., 2007). Qui plus est, les ions Cl^- sont progressivement remplacés par les espèces SO_4^{2-} et NO_3^- après les représentations, augmentant de ce fait le nombre d'ions inorganiques secondaires (SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+) émis (Li et al., 2013; Lin, 2016).

L'étude menée par Huang et al. mentionne que les concentrations de SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+ sont de 5,3, 7,2 et 5,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durant l'épisode de pollution, mais qu'ils augmentent ensuite à 19,2, 10,2 et 13,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Par conséquent, le moment et le site d'échantillonnage influent notablement sur la qualité des mesures. Dans certains scénarios, lorsque le lieu de collecte est éloigné de l'aire d'exposition, des niveaux élevés de SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+ et un haut ratio $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ sont les indicateurs de combustions pyrotechniques. Parallèlement, des quantités accrues de Cl^- sans variation de SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+ sont attendues lors de l'échantillonnage de PM pyrotechniques fraîches. (Lin, 2016).

Qui plus est, l'utilisation de pièces pyrotechniques est désignée comme l'un des principaux contributeurs à la contamination croissante du ClO_4^- dans l'environnement. Ce composé est employé afin de produire des explosions bruyantes, des flammes colorées et une lumière vive. Les sels de ClO_4^- servent d'oxydants dans la fabrication de propergols pour fusées solides, d'explosifs, de feux d'artifice, de fusées de signalisation et d'allumettes. La concentration de ClO_4^- présent dans les résidus de papier varie de 302 à 34 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et il est estimé que l'explosion de 1000 à 2000 bombes aériennes, soit un poids total de 1360 kg et composé de 40 % de ClO_4^- , peut contaminer une zone de retombées d'environ 3600 m^2 . Aux États-Unis, le dépôt annuel de ClO_4^- provenant des feux d'artifice varie de 0,7 à 2,6 kg (Coast Law Group [CLG], 2011). Les principaux facteurs qui influent sur la concentration retrouvée dans l'environnement sont la quantité et le type de feux d'artifice projetés, l'efficacité de l'oxydation du ClO_4^- , la direction et la vitesse du vent, le volume d'eau, les précipitations et l'évaporation. En Chine, le plus grand producteur mondial de feux d'artifice, la présence de ce composé est décelée dans les eaux souterraines, les eaux de surface, l'eau du robinet et les eaux embouteillées. De plus, les eaux superficielles mesurées près d'une manufacture d'articles explosifs chinois ont montré une concentration de ClO_4^- de 54,4 $\mu\text{g}/\text{L}$, soit 9 fois la valeur suggérée par l'US EPA (Sijimol et Mohan, 2014; Wu et al., 2010). Parallèlement, une étude canadienne décèle des quantités de ClO_4^- dans les eaux de surface du port d'Hamilton quatre jours après la fête nationale du Canada, mais aucune concentration n'est détectée une semaine plus tard (Wilking, Fine et Burnett, 2007).

3.5 Composés organiques

Un certain nombre de textes scientifiques signalent la présence de composés comme le carbone organique (C_{org}), le C_e , les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), quelques matières organiques ainsi que le CO_2 et le CO dans les émissions d'artifice.

Elles démontrent généralement une augmentation significative de C_{org} lors de la combustion, de même qu'une légère hausse de C_e . Une étude a toutefois détecté une diminution de C_e , possiblement dû au fait que le taux d'émission était alors moins important que la réduction des rejets provenant d'autres sources, soit les gaz d'échappement, à ce moment précis (Cheng et al., 2014). Néanmoins, un ratio C_{org}/C_e élevé demeure un bon indicateur d'activité pyrotechnique (Lin, 2016). Aussi, des valeurs plus élevées de C_{org} sont mesurées après les épisodes de déflagration dues à l'accroissement des niveaux de carbones organiques secondaires (C_{os}) (Sarkar et al., 2010).

D'autres recherches suggèrent que la présence d'HAP dans l'air n'est pas nécessairement causée par les événements pyrotechniques. Une seule étude réalisée en laboratoire relève que la combustion favorise la formation d'HAP de faible poids moléculaire, comme le naphthalène et l'acénaphthylène (Croteau et al., 2010). En fait, le brûlage de biomasse et de charbon ainsi que la circulation automobile sont les principales sources de rejet d'HAP. Par conséquent, la contribution directe des feux d'artifice peut paraître négligeable (Li et al., 2013; Sarkar et al., 2010).

Par ailleurs, les PM pyrotechniques contiennent des substances organiques dangereuses, tels certains composés aliphatiques, acides, esters, alcools et cétones (Lin, 2016; Nishanth et al., 2012). Toutefois, la littérature suggère que le niveau d'alcane, de molécules aromatiques, d'acide gras et d'acide dicarboxyliques autre que les HAP ne varie pas durant les représentations (Agrawal, Upadhyay et Sachdeva, 2011; Feng, Sun, Hu, Zhao, Wu et Fu, 2012; Perry et al., 1999; Wang et al., 2007).

Certains micropolluants organiques comme les PCDF et les polychlorodibenzodioxines (PCDD) sont aussi observés. En effet, plusieurs additifs organiques à haute teneur en chlore sont utilisés dans la confection de certains feux d'artifice afin d'intensifier les couleurs, majoritairement le bleu. À cet effet, la présence de composés organochlorés tels que le caoutchouc chlorobutylique, l'hexachloroéthane, le polychlorure de vinyle et les hexachlorocyclohexanes (HCH) est relevée dans quelques engins explosifs (Lin, 2016). Ces substances, en particulier les PCDD/F, sont préoccupantes en raison de leur persistance environnementale, leur bioaccumulation, de même que leurs effets toxiques à long terme. À cet effet, une étude allemande menée en 1999 calcule des hausses significatives de PCDD/F et HCB avec des concentrations respectives de 104 microgrammes/kilogramme ($\mu\text{g}/\text{kg}$) et 1400 milligrammes/kg (mg/kg) (Fleischer, Wichmann et Lorenz, 1999). Or, la Convention internationale de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP) interdit toute utilisation de ces produits depuis 2004 (UNEP, 2004).

Depuis, le projet EuroPoP mesure la présence de ces composés à l'intérieur des feux d'artifice vendus en Europe (CLEEN, 2012). Dans le cadre du projet, entre 2010 et 2012, 409 échantillons de 11 pays relèvent que 41 d'entre eux contenaient une quantité de HCB dépassant la valeur limite de 50 mg/kg. Parallèlement, une étude menée lors de la fête nationale Suisse en 2011 mesure des concentrations émises de HCB, pentachlorophénols, et PCDD/F égales à 297 pétagramme/mètre cube (pg/m^3), 218 pg/m^3 et 61 picogrammes/mètre cube (fg/m^3) respectivement (Schmid, Bogdal, Wang, Azara, Haag et Arx, 2014). Ces valeurs sont dix fois plus élevées que celles mesurées deux semaines auparavant et représentent, pour chacun, une émission annuelle de 1,5 kg. Les auteurs avancent également que l'extrapolation de ces rejets constituerait 2 à 14 % des émissions d'HCB en Suisse (Schmid et al., 2014). Qui plus est, plusieurs enquêtes conduites par le Réseau de mise en application de la législation chimique européenne (CLEEN) au Danemark (2008-2010) et en Autriche (2009-2010) ont relevé des concentrations allant jusqu'à 4,4 % en poids d'HCB.

3.6 Synthèse du corpus littéraire

Les données exposées dans ce chapitre relèvent principalement de 49 articles scientifiques, lesquels sont présentés au tableau 3.5. Ces revues littéraires sont communément utilisées comme cadre référentiel dans plusieurs recherches se rapportant aux feux d'artifice. Parmi ces 49 sources, 7 mentionnent les risques sanitaires, 10 font l'étude d'émissions de composés organiques, 5 de HAP, 12 de C_e et C_{org} , 17 d'ions, 25 de métaux, 7 de matières particulaires totales (TSP), 28 de PM_{10} et 21 de $PM_{2,5}$. Ils mentionnent tous des variations atmosphériques d'un ou plusieurs des substances mentionnées précédemment.

Tableau 3.5 Caractéristiques clés de 49 études d'intérêts au sujet de l'effet des feux d'artifice sur les PM ambiantes (modifié de : Lin, 2016)

Méthode d'échantillonnage	Types de PM		Composition des PM							Recherches	
	PM _{2,5}	PM ₁₀	TSP	Métaux	Ions	C _e et C _{org}	HAP	Organiques	Risques pour la santé	Auteurs	Année
A		◊							◊	Smith	1975
				◊						Kulshrestha et al.	2004
	◊				◊			◊		Drewnick et al.	2006
		◊		◊	◊	◊				Moreno et al.	2007
	◊	◊		◊	◊					Wang et al.	2007
	◊	◊	◊	◊					◊	Thakur et al.	2010
			◊					◊		Agrawal. et al.	2011
			◊							Majumdar et al.	2011
				◊						Crespo et al.	2012
				◊					◊	Do et al.	2012
		◊								Mandal. et al.	2012
	◊	◊			◊					Rao et al.	2012
	◊	◊		◊						Tiwari et al.	2012
		◊		◊	◊					Ambade et al.	2013
		◊			◊					Chatterjee et al.	2013
			◊		◊	◊				Pachauri et al.	2013
		◊	◊							Pathak et al.	2015
		◊								Ravindra et al.	2003
		◊		◊						Barman et al.	2008
	◊			◊						Joly et al.	2010
B		◊		◊						Sarkar et al.	2010
	◊	◊		◊		◊	◊		◊	Chang et al.	2011
	◊	◊		◊		◊				Tsai et al.	2012
	◊	◊		◊	◊	◊			◊	Beig et al.	2013
C		◊		◊						Tandon et al.	2008
		◊		◊		◊				Vecchi et al.	2008
	◊				◊		◊	◊		Li et al.	2009
	◊			◊						Shen et al.	2009
		◊		◊						Camilleri et al.	2010
		◊	◊	◊						Godri et al.	2010
		◊		◊	◊	◊				Singh et al.	2010
	◊	◊		◊	◊	◊		◊		Perrino et al.	2011
	◊	◊		◊	◊	◊	◊	◊		Feng et al.	2012
		◊		◊	◊	◊		◊		Huang et al.	2012
	◊	◊								Khapande et al.	2012
	◊	◊			◊			◊		Nirmal.kar et al.	2013
	◊	◊					◊			Jiang et al.	2014
	◊	◊			◊	◊				Shi et al.	2014
	◊	◊			◊	◊				Tian et al.	2014
	◊			◊	◊	◊			◊	Yang et al.	2014
D	◊			◊				◊	◊	Kong et al.	2015
		◊						◊		Perry	1999
								◊		Nishanth et al.	2012
	◊					◊				Li et al.	2013
E		◊		◊						Cheng et al.	2014
		◊		◊						Deka et al.	2014
			◊		◊		◊	◊		Dutcher et al.	1999
									◊	Croteau et al.	2010

Méthode d'échantillonnage: «A» échantillonnage extérieur à proximité du lieu de lancement ou de la zone urbaine pendant moins de 10 jours; «B» deux sites ou plus d'échantillonnage extérieur à proximité du site de lancement ou de la zone urbaine pendant moins de 10 jours; "C" échantillonnage extérieur près du site d'affichage ou de la zone urbaine pendant plus de 10 jours; "D" échantillonnage extérieur éloigné du site d'affichage ou de la zone urbaine; "E" échantillonnage à l'intérieur.

4. IMPACT DES FEUX D'ARTIFICE SUR L'ENVIRONNEMENT

Ce chapitre présente les conséquences environnementales potentielles des émissions pyrotechniques. Pour ce faire, les répercussions des émissions polluantes sur l'atmosphère, les sols et les eaux douces sont expliquées.

4.1 Conséquences atmosphériques des émissions polluantes

L'atmosphère est le plus petit réservoir géologique de la terre et sa taille limitée la rend vulnérable à la contamination. Au niveau de la mer, les propriétés physicochimiques de ce milieu sont liées à celle de la troposphère, s'étirant en moyenne jusqu'à 12 km. La dilution et le mélange des substances qui y sont ajoutées s'effectuent à l'intérieur d'un court laps de temps et occasionnent une distribution rapide des contaminants aux quatre coins du monde (Olivier, 2015). La troposphère est l'une des quatre bandes atmosphériques, telle que montrée à la figure 4.1.

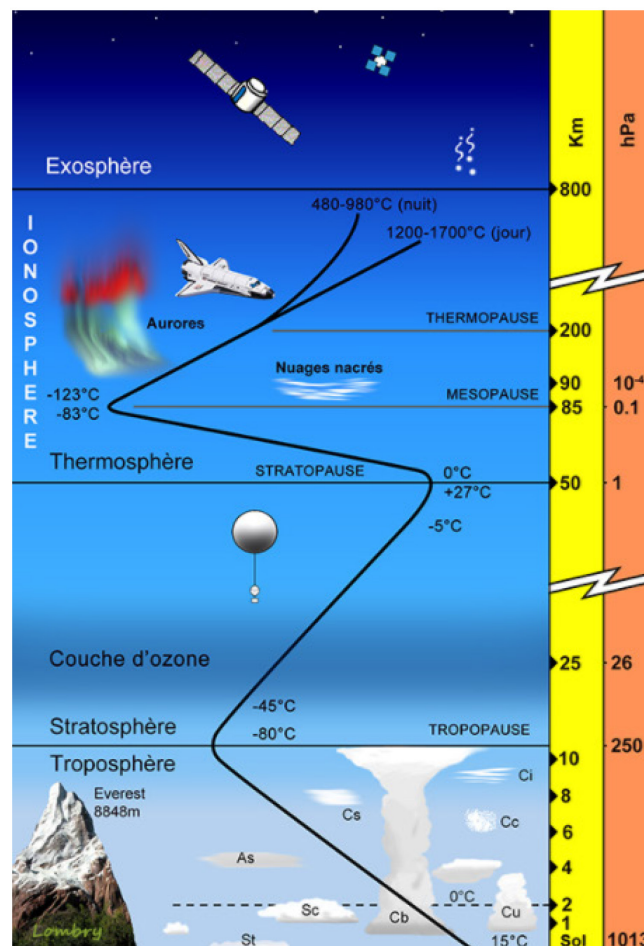


Figure 4.1 Stratifications atmosphériques (tiré de : Luxorion, s. d.)

Elle est à l'origine des phénomènes météorologiques comme la pluie et la neige et se caractérise par une décroissance constante de la température avec l'altitude (Luxorion, s. d.). Sa composition est extrêmement homogène en raison du brassage continu de l'air, expliqué en partie par l'agitation thermique (turbulence). Elle est principalement constituée de diazote (N_2) et de dioxygène (O_2) et contient également des quantités traces de gaz inertes (Ar, Ne, He, Kr, Xe) et de dioxyde de carbone (CO_2). D'autant plus, elle recèle près de 80 % de la masse totale des composés présents dans l'atmosphère et englobe la quasi-totalité de la vapeur d'eau et des aérosols (Hervo, 2013). Ce milieu est oxydant en raison de l'existence d'une grande quantité de radicaux hydroxyles ($\bullet OH$) ($10^6/cm^3$) qui agissent comme intermédiaires principaux dans les réactions d'oxydation. Un mécanisme séquentiel produit cette espèce dans la troposphère : la photolyse du N_2 libère de l'oxygène atomique permettant la formation d' O_3 et la décomposition de celui-ci génère deux $\bullet OH$ par réaction avec l'eau. En absence de pollution, son premier rôle est de limiter la concentration de CO à 0,12 parties par million (ppm). Cela dit, les molécules facilement oxydables ont un court temps de résidence dans l'atmosphère, contrairement à ceux où la vitesse de réaction est plus lente. Les substances plus résistantes à l'oxydation s'accumulent alors dans la troposphère et finissent par fuir à travers la tropopause jusqu'à la stratosphère. À l'intérieur de cette stratification, les vents sont inexistantes et la dispersion des contaminants est longue. En plus de perturber le cycle de l' O_3 , les aérosols s'y étalent progressivement en couches étendues et y demeurent pendant plusieurs années (Olivier, 2015). Le tableau 4.1 présente le temps de résidence de certains gaz dans la basse atmosphère.

Tableau 4.1 Temps de résidence de certains gaz traces dans l'atmosphère (modifié de : Andrews et al., 2004)

Composés	Temps de résidence
N_2	$1,6 \times 10^7$ ans
He	10^6 ans
O_2	3000 à 10 000 ans
CO_2	3 à 4 ans
O_3	100 jours
CO	60 jours
SO_2	5 à 10 jours
NH_3 et NH_4^+	2 à 10 jours
NO_2	0,5 à 2 jours
NO	0,5 à 2 jours

4.1.1 Effets des matières particulaires

Les feux d'artifice génèrent des nuages de fumée dense, composée de KNO_3 , de soufre et de charbon en plus d'une grande quantité de PM. Ces dernières ont des durées de vie atmosphérique beaucoup plus

courtes que les gaz à effet de serre (GES), mais jouent tout de même un rôle important dans le fonctionnement du climat. Suivant leur composition et leur concentration, les PM interagissent avec le flux solaire et perturbent l'équilibre radiatif du système atmosphère-terre, phénomène quantifié par le forçage radiatif (FR). Ce terme décrit comment un composé ou un processus influence la balance entre le rayonnement solaire entrant et les émissions radiatives infrarouges sortantes de la tropopause : un FR positif mène à un réchauffement de la surface terrestre alors qu'un FR négatif tend à la refroidir. Ces effets peuvent être catégorisés comme directs ou indirects.

Les effets directs sont provoqués par la diffusion ou l'absorption du rayonnement solaire par les PM en suspension, où les PM plus sombres (C_e , suie) absorbent les rayons électromagnétiques et réchauffent l'atmosphère (FR positif). D'autant plus, lorsqu'elles sont déposées sur la neige ou la glace, soit les surfaces les plus réfléchissantes de la terre, elles entraînent une réduction considérable de la réflectance, aussi nommé albédo. La plupart des autres espèces de PM, y compris les sulfates, nitrates et C_{org} de couleur claire, reflètent les radiations entrantes et, par conséquent, neutralisent le réchauffement causé par les PM sombres et les GES. De ce fait, la rétrodiffusion des rayons vers l'espace induit une baisse de l'énergie incidente à la surface terrestre qui se traduit par une diminution de la température troposphérique (forçage radiatif négatif). Les PM riches en métaux ont aussi un fort pouvoir réfléchissant en raison de leur couvert brillant. En ce qui a trait aux feux à grand déploiement, ces événements dégagent une énorme quantité de PM dans l'atmosphère en très peu de temps (20-30 min) et concentrent les effets de réflectance et d'absorption radiatives près des lieux d'émissions, où les écrans de fumée sont plus focalisés.

Une augmentation substantielle de PM en suspension peut également entraîner des effets indirects en modifiant les propriétés optiques des nuages. Dépendamment de leur taille, leur composition chimique, leur état de mélange et leur concentration, les PM agissent comme noyau de condensation et amplifient l'abondance des gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace à l'intérieur des nuages. Cela accentue l'effet albédo et conduit à un FR négatif. Un second effet indirect s'exprime par le changement de la persistance des couverts nuageux. Effectivement, la réduction du diamètre moyen des gouttelettes augmente leur temps de résidence et occasionne une baisse de précipitation. Cela induit des modifications quant à la quantité d'eau atmosphérique, la répartition verticale des vapeurs d'eau, les transferts de chaleur et la durée de vie des nuages, ce qui perturbe inévitablement le cycle hydrologique terrestre. Les zones fortement polluées sont davantage vulnérables face à ce phénomène, comme l'Inde et la Chine où la

fréquence et l'intensité des spectacles pyrotechniques exacerbent les problèmes environnementaux préexistants. (Gieré et al., 2010; Planète viable, 2012)

Les effets des PM sur le climat sont toutefois difficilement quantifiables en raison de leurs caractéristiques physiques et chimiques complexes et leur distribution spatiale dans la troposphère. Par ailleurs, la subtilité découle des modifications subies par les PM lorsqu'elles sont en suspension dans l'air, tel que la croissance hygroscopique, la déliquescence, les réactions avec les acides et les gaz, la condensation de la vapeur, l'altération des propriétés optiques et la coagulation. (Gieré et al., 2010)

Cela dit, la taille des PM est directement proportionnelle à leur temps de séjour et à la distance qu'elles parcourent avant de se déposer au sol par sédimentation ou condensation (Olivier, 2015). Les PM fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$) sont généralement plus diversifiées que les PM grossières ($>10\ \mu m$) et sont de nature secondaire : condensation à partir de la phase vapeur et réactions chimiques des précurseurs gazeux par nucléation, condensation et coagulation. Tels que vu au chapitre 3, les PM fines peuvent également contenir des condensats de COV, de métaux vaporisés et de produits de combustion incomplète. Le temps de résidence des PM_{10} et $PM_{2,5}$ dans l'atmosphère est d'environ une semaine, ce qui leur permet d'être transportées sur de longues distances. Les PM grossières sont quant à elles visibles à l'œil nu et retombent rapidement au sol (CITEPA, 2017).

Les PM de grande taille sont moins inquiétantes pour la santé, car elles sont retenues par les voies aériennes supérieures et ne pénètrent pas dans l'appareil respiratoire de l'homme. Les PM_{10} peuvent toutefois être inhalées, mais sont généralement éliminées par les cils et la toux. Néanmoins, les $PM_{2,5}$ sont extrêmement dangereuses du fait qu'elles accèdent aux voies pulmonaires terminales et s'y déposent par sédimentation ou encore s'introduisent dans le système sanguin. Elles peuvent alors véhiculer des composés comme les métaux lourds, des ions (ex. SO_4^{2-} , NO_3^-) et des substances organiques toxiques (ex. COV, POP).

Quelques études démontrent les problèmes de santé attribuables aux feux d'artifice. En effet, Hirai et al constatent que l'inhalation de fumée pyrotechnique peut provoquer de la toux, de la fièvre et de la dyspnée chez les spectateurs et entraîner une pneumonie éosinophilique aiguë. Des obstructions pulmonaires chroniques, l'exacerbation de l'asthme, la fibrose, des maladies cardiovasculaires ainsi que le cancer du poumon sont aussi observés. Les conséquences d'une telle inhalation sont particulièrement graves pour les nourrissons, les femmes enceintes, ainsi que les personnes âgées (Gieré et al., 2010).

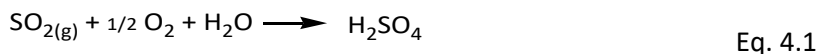
4.1.2 Effets du SO₂ et des NO_x

La combustion de pièces pyrotechniques peut générer des précipitations acides sous forme de pluie, neige, verglas ou brouillard à un pH inférieur à 5 par le biais des rejets de SO₂ et NO_x gazeux. Ces composés s'associent dans l'atmosphère à des PM hydrophiles et se fixent à l'intérieur des gouttelettes d'eau formées à leur surface. Les principales sources anthropiques sont toutefois les centrales thermiques au charbon et les fonderies de métaux non ferreux.

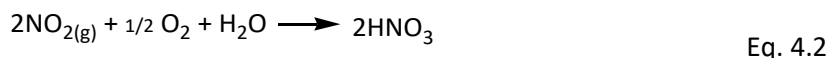
Lorsque les précipitations ont lieu à proximité des zones d'émission, les retombées sont dites sèches. C'est-à-dire que ces gaz ne sont pas modifiés avant de toucher le sol, mais qu'ils se transforment en acide fort au contact avec une surface et abaissent le pH du milieu environnant. À l'inverse, une concentration élevée de SO₂ et de NO_x ainsi qu'un long temps de résidence des PM dans l'atmosphère permet de former des espèces acides en altitude. Au Québec, plus de 75 % du SO₂ et des NO_x arrivent des États-Unis et de l'Ontario et sont transportés sur de grandes distances à l'intérieur des masses d'air en provenance du Sud-ouest. Dans le Sud-est canadien, la saison a aussi des répercussions sur l'intensité des apports. En effet, la qualité de l'air est diminuée en été en raison d'un déplacement majeur des colonnes d'air vers le nord-est, alors qu'en hiver ce sont des masses d'air polaire moins polluées qui pénètrent cette région. Les mesures de ces gaz sont utilisées comme indicateurs des apports en acide sulfurique (H₂SO₄) et nitrique (HNO₃). La hausse des activités pyrotechniques en saison estivale augmente ainsi les charges polluantes acheminées sur les terres québécoises et accentue les problèmes de pluies acides. (Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2004)

Les composés soufrés, comme le SO₂, jouent un rôle majeur dans la chimie atmosphérique et influencent le bilan radiatif de façon directe et indirecte. Le SO₂ est un gaz très soluble qui est éliminé par lessivage ou encore par dépôt sec. Dans l'atmosphère, cette espèce est rapidement oxydée en SO₃²⁻ et SO₄²⁻ particulaires puis hydratée en H₂SO₄. Cet acide évolue ensuite vers la phase particulaire par nucléation ou condensation sur une PM préexistante (Adon, 2011). Le SO₄²⁻, environ 30 fois moins phytotoxique que le SO₂, est un polluant globalement répandu. Il est suffisamment hygroscopique pour que, dans l'air humide, il existe significativement dans la fraction des PM grossières. Il est toutefois inhabituel que des niveaux nocifs de SO₄²⁻ particulaire se déposent sur la végétation, alors que des dommages directs dus au SO₂ sont couramment observés à proximité de sources ponctuelles incontrôlées (Grantz, Garner et Johnson, 2003). Le rapport SO₄²⁻/SO₂ augmente avec le vieillissement de la masse d'air et, par conséquent, avec la distance de la source d'émission.

Les rejets pyrotechniques de SO₂ jouent donc un rôle de première importance dans l'apparition des espèces partiellement et complètement oxydées, SO₃²⁻ et SO₄²⁻, mais aussi dans la formation de H₂SO₄, montré à l'équation suivante :



Dans l'atmosphère, une large fraction de NO émis est oxydée par les réactions photochimiques en HNO₃ ou NO₃⁻ organiques. Le principal puits de HNO₃ est son lessivage par les précipitations en raison de sa grande solubilité. Or, s'il n'est pas déposé au sol, le HNO₃ peut servir de réservoir pour les NO_x et les régénérer hors des sites d'émission par photolyse ou encore par oxydation à l'aide des radicaux •OH. Son temps de vie est assez court, mais relativement plus long que celui des NO_x qui est de 9 h au sol. (Adon, 2011). L'équation globale de la formation de HNO₃ est décrite comme suit :



4.1.3 Effets de l'ozone troposphérique

Comme lu au chapitre 3, le NO₂ peut générer de l'O₃ troposphérique. Ce dernier contribue à l'effet de serre en raison de son moment dipolaire fluctuant qui lui permet d'absorber l'énergie radiante émise par la terre. Ces radiations sont ensuite converties en énergie cinétique puis, suite aux collisions moléculaires, diffusées sous forme de chaleur dans l'atmosphère (Olivier, 2015). D'autant plus, sa réaction avec d'autres gaz mène à l'augmentation du pouvoir oxydant de la troposphère. Le principal puits de l'O₃ troposphérique est le dépôt sec à la surface terrestre, mais il est aussi éliminé de l'atmosphère par réaction avec le NO et par photodissociation (US EPA, s. d.). Lorsqu'il est inhalé, l'O₃ pénètre dans les voies respiratoires et provoque des toux et une altération pulmonaire, surtout chez les enfants et les asthmatiques, ainsi que des irritations oculaires (Adon, 2011).

4.1.4 Effets du perchlorate

La contamination par le ClO₄⁻ dû aux feux d'artifice a entre autres été signalée au Canada, aux États-Unis, en Inde, en Chine et au Japon. En Chine, le ClO₄⁻ a été détecté dans des échantillons de sang de la population de la ville de Nanchang, où s'effectue la fabrication de pièces pyrotechniques en grande quantité. Au Japon, les feux d'artifice sont soupçonnés de contribuer à l'augmentation de la quantité de ClO₄⁻ dans le lait de vache.

En milieu urbain, les PM contaminées décantées peuvent être remises en suspension par les vents en dehors des périodes de festività et cette fraction, mélangée à des PM transfrontalières, se déposent à nouveau pour produire un flux air-sol de ClO_4^- de longue durée. La pluie est un élément clé dans le retour à l'atmosphère des PM déposées au sol et accroît significativement la persistance du ClO_4^- dans l'environnement urbain (Sijimol, et Mohan, 2014). Les vents et la direction des tempêtes jouent également un rôle majeur dans la sédimentation finale de ce composé, où les concentrations continuent d'augmenter loin du site d'exposition (Munster, Hanson, Jackson et Rajagopalan, 2009). De plus, le niveau de décroissance du ClO_4^- corrèle avec l'augmentation des températures en raison de l'accroissement de la dégradation aérobie. Un temps de demi-vie moyen de 29 jours est observé.

L'exposition humaine aux PM pyrotechniques contaminées par le ClO_4^- peut se produire par inhalation, exposition cutanée et ingestion de poussières (Wu, Oldi et Kannan, 2011). Ce composé peut ainsi gravement affecter la santé humaine en interférant avec l'absorption d'iodure dans la glande thyroïde. Chez les adultes, la glande thyroïde aide à réguler le métabolisme en libérant des hormones, tandis que chez les enfants elle assure un développement normal (Vella, Chircop, Micallef et Pace, 2015).

4.1.5 Effets des POP

Certains produits organiques émis par les feux d'artifice résistent à l'oxydation et deviennent ainsi des POP. Cela est dû à leur grande stabilité structurale procurée par les composés halogénés liés aux cycles carbonés et c'est le cas, entre autres, du HCB, des furanes et des dioxines. Ces espèces ont une très faible pression de vapeur qui empêche une dispersion normale par volatilisation et les exclus de la catégorie des COV. Ils peuvent toutefois se vaporiser partiellement dans la troposphère lorsqu'exposés à une grande chaleur, soit en période de canicule ou sous les rayons du soleil, mais se condensent aussitôt lors d'une chute de température. Ce faisant, ils se déposent sur les édifices, les sols, les eaux et les végétaux et induisent une forte contamination, laquelle est décrite à la section 4.3. À l'arrivée d'un autre coup de chaleur, ces composés se volatilisent à nouveau et voyagent sur une certaine distance avant de se condenser une seconde fois. Ce phénomène est nommé l'effet sauterelle. Ils sont toutefois de moins en moins évaporés lorsqu'ils pénètrent dans les territoires plus au nord, où les températures sont plus froides, et s'y accumulent. Ainsi, des concentrations élevées peuvent être mesurées loin de leur source d'émission, notamment en Arctique. (Olivier, 2015)

4.1.6 Pollution sonore

Le son produit par les feux d'artifice peut atteindre 150 à 175 décibels (dB) et induire une pollution sonore sévère. Or, l'OMS recommande que les adultes ne soient pas exposés à plus de 140 dB de pression acoustique maximum, alors que pour les enfants cette limite est de 120 dB. Les nourrissons sont encore plus sensibles et ne doivent pas être exposés aux feux d'artifice. (Ministère de la Santé et des Services sociaux [MSSS], 2017)

Qui plus est, les explosions et les éclairs lumineux peuvent avoir un impact négatif sur la faune locale. Par exemple, en 2012 en Arkansas, quelques 5000 Carouges à épaulettes ont été tués à la suite d'un mouvement de panique causé par les sons des artifices. Il est aussi observé que plusieurs espèces d'oiseaux abandonnent leur nid suite à la peur suscitée par les explosions. Cela peut avoir de graves répercussions sur la pérennité de l'espèce si les épisodes de feux concordent avec les périodes de reproduction. Les œufs ou les jeunes progénitures laissés dans les nids abandonnés sont alors tués par des prédateurs ou meurent par manque de soins. (eRSE, 2016)

4.2 Conséquences des retombées polluantes sur les sols

Un sol est dit pollué lorsqu'il « contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour la santé, les plantes ou les animaux » (Orée, s. d.). Constitué de débris rocheux, de grains de sable, de particules d'argile, d'éléments minéraux et de matières organiques où circulent une quantité limitée d'air et d'eau, le sol est une ressource sensible et très peu renouvelable pouvant se dégrader à l'intérieur de quelques années seulement. À l'inverse, il lui faut plusieurs milliers d'années pour se régénérer. Cela dit, les activités anthropiques, en passant de l'urbanisation à l'agriculture intensive, ont gravement altéré la composition chimique et physique de ces systèmes (Ville de Montréal, s. d.). Lorsque situés près de zones végétalisées, les spectacles pyrotechniques exacerbent la déposition de certains contaminants, qui pénètrent dans les milieux naturels et provoquent une surcharge polluante.

Notamment, une étude menée en Inde démontre la chute des concentrations de microorganismes dans les sols et les eaux de sites fréquemment employés en pyrotechnie. De surcroît, les mesures de populations bactériennes hétérotrophes totales exhibent des valeurs 2300 fois plus élevées dans les sols cultivables ainsi que deux fois plus grandes dans les régions urbaines. Parallèlement, les échantillons prélevés dans les eaux bordant les terres labourables et urbaines indiquent la présence de 695 et 32 fois plus de microorganismes, respectivement. Cela dit, la croissance des populations microbiennes est principalement influencée par la quantité et le type de nutriments disponibles, le taux d'humidité, la

température et le pH. Ces paramètres ne semblent pas optimaux dans les zones d'utilisation de produits pyrochimiques et l'apport de substances chimiques semble avoir réduit considérablement l'abondance et le type de nutriments essentiels dans les milieux touchés. (Dhasarathan, Theriappan et Ashokraja, 2010)

Cette section met donc en lumière les répercussions d'un apport supplémentaire de PM, de métaux traces, de composés soufrés et azotés, d'O₃ et de ClO₄⁻ sur le sol et les organismes vivants terrestres.

4.2.1 Effets des matières particulières au sol

Les PM fines et grossières réagissent au taux d'humidité atmosphérique, aux précipitations ainsi qu'aux vents, modifiant alors leurs modes de déposition au sol. Le dépôt de PM dans les écosystèmes se fait selon trois voies : humide, sèche et occulte. Les dépôts humides résultent de l'incorporation des PM et des gaz dans les gouttelettes de nuages par nucléation et de leur précipitation subséquente sous forme de pluie, de neige ou encore par lessivage. Le dépôt sec est un processus beaucoup plus lent régi par la stabilité atmosphérique ainsi que le diamètre, la constitution chimique et la rugosité des PM. Le dépôt occulte est quant à lui représenté par la dissolution des espèces polluantes gazeuses dans les gouttelettes d'eau suspendues dans le brouillard et les nuages. Une condensation aqueuse se produit alors sur les PM fines préexistantes, qui vont ensuite coalescer ou se dissoudre. Ce type de déposition est exacerbé dans les sites à haute altitude, les zones côtières sujettes à l'advection terrestre ainsi que les milieux sensibles aux brouillards de rayonnement. (Grantz et al., 2003)

Le dépôt de PM atmosphériques a une grande incidence dans la biogéochimie des sols, où les répercussions sur la végétation dépendent des constituants chimiques et de la taille des émissions particulières. Elles peuvent affecter la végétation directement après leur dépôt sur les surfaces foliaires ou indirectement en modifiant la composition du sol et la quantité de rayonnements incidents. Les principaux effets nocifs sont néanmoins causés par l'altération chimique des sols, comme le lessivage d'éléments nutritifs vers les eaux de surface par les résidus acides. L'absorption racinaire de certains composés contenus dans les PM peut aussi nuire au processus photosynthétique et réduire leur taux de croissance et de production. En revanche, des abrasions à la surface des feuilles et des tiges peuvent être observées lors d'un contact physique avec les PM. (GC, 2017)

L'impact écologique des particules est augmenté chez les PM fines en raison de leur capacité oxydante, leurs interactions avec d'autres polluants comme l'O₃ et leur adsorption de composés organiques photoactifs. Cependant, les effets indirects sont généralement plus importants, car ils peuvent altérer le cycle nutritionnel et inhiber l'assimilation des nutriments par les plantes (Grantz et al., 2003). Les dépôts

acides sont particulièrement problématiques dans l'est du Canada en raison du manque d'alcalinité naturelle d'une grande partie des terres, ce qui empêche toute neutralisation (GC, 2013 b).

4.2.2 Effets des métaux traces au sol

Au cours de leur évolution, les plantes ont développé plusieurs mécanismes biochimiques qui leur ont permis de s'adapter et de tolérer de nouveaux milieux chimiquement déséquilibrés. Toutefois, l'excès de métaux traces dans les sols constitue un stress considérable pour les végétaux, voire même plus qu'une situation de carence. Cela mène certaines espèces à développer des mécanismes de protection, telle l'exclusion d'un élément lorsque sa concentration dans le milieu extérieur est élevée. Il est cependant remarqué qu'une décomposition réduite des matières végétales se produit à proximité de sources d'émission de métaux lourds (Hg, Cr, Cd, As, Pb) et que ces derniers peuvent être mobilisés et devenir plus biodisponibles à mesure que le pH diminue. La littérature révèle une corrélation entre le dépérissement forestier et l'accroissement de l'absorption de métaux trace à l'intérieur du feuillage dans des conditions de bas pH et à des concentrations élevées de PM métalliques. Cette haute concentration, d'un ordre de grandeur normalement plus élevé que dans la pluie, est souvent détectée dans les brouillards acides distinctifs des stations situées en haute altitude. Les cires à la surface des feuilles sont alors chimiquement altérées et tendent à fixer des solutés susceptibles d'entraîner l'absorption d'ions nocifs (Environnement Canada [EC], 2004). L'impact de ces espèces sur la végétation est également décelé par des mesures de phytochélatines. Les phytochélatines sont des peptides de liaison métallique intracellulaire qui agissent en tant qu'indicateurs spécifiques de l'exposition aux métaux traces. Parce qu'ils sont produits par les plantes en réponse à des concentrations sublétales, leur présence dans certains environnements précaires suggère que les métaux traces jouent un rôle dans le déclin des écosystèmes (Grantz et al., 2003).

Cela dit, les paramètres du sol et la capacité d'absorption des végétaux sont les principaux facteurs régissant la phytodisponibilité d'un élément. En effet, le pH, le potentiel d'oxydoréduction (Eh), la texture du sol, la quantité et la qualité des matières organiques, la composition minérale, la température ainsi que le régime de l'eau sont les variables maîtresses contrôlant la biodisponibilité d'une substance (Kabata-Pendias, 2004). En général, les plantes absorbent facilement les éléments solubilisés dans le sol, présents aussi sous formes ioniques et complexées libres. Leur biodisponibilité, contrôlée par la spéciation chimique et les propriétés du sol, est considérée comme le facteur clé dans l'évaluation des risques pour les écosystèmes (Teh, Norulaini, Shahadat, Wong et Mohd, 2016). La spéciation des métaux traces, soit la répartition entre les différents états de valences, est liée à leur réactivité biogéochimique de même qu'à plusieurs conditions physicochimiques du sol. Ils sont généralement échangeables ou solubles dans l'eau,

spécifiquement sorbés, organiquement liés, occlus dans les oxydes et hydroxydes de Fe/Mn et structurellement liés à l'intérieur des minéraux. Cependant, la spéciation de ces espèces est instable et une transformation relativement aisée de leurs formes chimiques est observée.

Ainsi, les principaux dangers environnementaux dus à l'absorption de métaux par la flore sont leur introduction dans la chaîne alimentaire, la perte de couvertures végétales induite par la phytotoxicité puis le cyclage des métaux vers la surface du sol par des plantes tolérantes. Ces risques dépendent également des propriétés géochimiques et biochimiques d'un élément donné et sont liés aux processus suivants (Grantz et al., 2003) :

- Bioaccumulation :
 - a) du milieu aquatique : Hg, Cd, Pb, Cu, Zn, Sr;
 - b) du sol : Cd, Zn, B, Ni, Sn, Cs, Rb;
- Sorption de la voie alimentaire : Cd, Hg, Zn, I, B;
- Pénétration dans le placenta : Cd, Hg, Pb, Zn, I;
- Pénétration à travers la barrière hématoencéphalique : Hg, B, Al, Pb;
- Dommages aux membranes, enzymes et divers composants protéiques : Hg, Pb, Cd, Zn, Ni, Se;
- Dommages à la chaîne d'acide nucléique : Cd, Cu, Zn, Hg, Ni.

4.2.3 Effets du SO₂ et NO_x au sol

La décantation de composés azotés et soufrés dans l'environnement est souvent associée à l'acidification des sols. Les arbres morts ou mourants sont fréquemment recensés dans les zones touchées par les pluies acides en raison du lessivage de l'aluminium et de l'élimination des matières dont les végétaux ont besoin pour se développer. Le brouillard acide et les nuages de haute altitude peuvent aussi dépouiller les éléments nutritifs des feuillages ainsi leur donner un aspect brunâtre. Les arbres sont alors moins aptes à absorber les rayons solaires, ce qui les rend faibles et sensibles aux températures de congélation. Toutefois, plusieurs forêts, ruisseaux et lacs victimes des pluies acides ne subissent pas d'effets en raison du pouvoir tampon des sols environnants. Cette capacité dépend de l'épaisseur et de la composition du sol, de même que le type de roche sous-jacente. Dans les régions montagneuses du nord-est des États-Unis, le sol est mince et n'a pas la capacité de neutraliser adéquatement l'acide dans l'eau de pluie. Ces zones sont par conséquent vulnérables à l'accumulation d'espèces caustiques et d'aluminium. Encore, la fonte des neiges et les précipitations abondantes peuvent entraîner un phénomène connu sous le nom d'acidification épisodique. Les lacs qui ne présentent normalement pas un niveau d'acidité élevé peuvent

alors subir des effets temporaires lorsque le sol ne peut pas amortir la quantité de dépôts accumulés. Cette courte diminution de pH peut entraîner un stress sporadique sur l'écosystème où une variété d'organismes et d'espèces peuvent être blessés ou encore éliminés. (US EPA, s. d.)

L'azote est d'une importance primordiale dans le métabolisme des plantes et, dans une large mesure, régit l'utilisation du phosphore, du potassium et d'autres nutriments. Pour cette raison, le dépôt terrestre de composés azotés peut avoir un impact majeur. La plus grande fraction de l'azote dans les sols est associée à la matière organique, et sa disponibilité contrôle la productivité primaire nette et, éventuellement, le taux de décomposition de la litière végétale. Les dépôts de NO_3^- et de NH_4^+ particuliers et de l'espèce réduite NH_3 entraînent des changements dans les landes via deux modes distincts : d'une part, l'acidification du sol et la perte de cations basiques (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) et d'autre part, l'enrichissement en azote qui induit des taux de croissance « anormaux » et des relations compétitives altérées chez les végétaux (Grantz et al., 2003).

Les plantes absorbent habituellement l'azote sous forme de NH_4^+ ou NO_3^- directement de la terre par l'intermédiaire de leurs racines ou encore par l'entremise d'organismes symbiotiques. Leurs capacités d'assimilation varient toutefois d'une espèce à l'autre. Notamment, lorsque l'azote devient plus disponible, les plantes adaptées à un environnement de faible concentration sont remplacées par des espèces capables d'en utiliser davantage, puisqu'elles ont un gain concurrentiel. De surcroît, un apport supplémentaire à l'intérieur de milieux récepteurs en carence altère l'équilibre des relations compétitives, la composition des espèces et la diversité des écosystèmes (Grantz et al., 2003). Par ailleurs, lorsque les dépôts excèdent la capacité des milieux terrestres à utiliser l'azote, il peut y avoir une surcharge d'azote inorganique en circulation et, de là, une acidification des sols et des eaux de surface en plus d'une déplétion en cations basiques. Il est ainsi craint que l'azote contenu dans les dépôts acides altère la chimie du sol et nuise aux arbres et à la qualité de l'eau. (EC, 2004)

Par ailleurs, les cations basiques (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) sont des éléments nutritifs essentiels au métabolisme et à la croissance de la flore. Les cycles de ces espèces diffèrent de ceux de l'azote, du phosphore et du soufre dû au fait que le calcium, le potassium et le magnésium existent en tant que cations. Cela impacte considérablement les cycles nutritionnels et leurs réactions face aux dépôts acides. Les cations basiques sont libérés par l'altération des minéraux primaires en sites d'échange cationiques, où ils sont disponibles pour l'absorption par les plantes. En revanche, l'acidification du sol occasionne la liaison de H^+ et Al^{3+} au complexe argilo-humique, au détriment des ions Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} . Ces derniers se trouvent alors en grande proportion dans la solution du sol et sont susceptibles d'être lixiviés. De nombreux écosystèmes forestiers

montrent une perte nette de cations basiques, phénomène exacerbé par les dépôts acides (Grantz et al., 2003). Les arbres au feuillage en carence sont alors plus vulnérables aux stress naturels comme le gel, la sécheresse et la défoliation par les insectes. Or, une acidification prolongée occasionne d'abord un effet fertilisant par la mobilisation des cations basiques, suivi du déclin des taux de croissance par leur lessivage et la disponibilité de Al^{3+} . Les solutions de sol devenues caustiques se drainent alors dans les cours d'eau à proximité. (EC, 2004).

Enfin, les plantes supérieures ont une sensibilité élevée au SO_2 atmosphérique par rapport aux autres organismes vivants. Les composés sulfatés peuvent facilement atteindre les feuilles des plantes à travers les stomates ou les racines et, lors d'une exposition à long terme, s'accumuler dans les tissus internes et les feuilles. De nombreux changements physiologiques associés à un tel stress sont observables, notamment la réduction de la longueur et de la hauteur de la tige, la diminution de la taille des feuilles et le déclin des tissus phytosynthétiquement actifs (Aljahdali, 2008). Dans les sols, le SO_4^{2-} adsorbé à la surface des minéraux forme un équilibre cinétique avec le SO_4^{2-} en solution (EC, 2004).

4.2.4 Effets de l'ozone troposphérique au sol

Lorsqu'émis dans la troposphère, l' O_3 peut être absorbé par les plantes à travers les stomates de leurs feuilles et causer des dommages directs, comme le vieillissement prématuré et la diminution des facultés d'absorption du CO_2 . Il peut aussi agir indirectement en détournant l'énergie habituellement utilisée dans les processus physiologiques importants pour les consacrer à son élimination. De ce fait, il peut en résulter un changement dans les écosystèmes où les espèces végétales plus résistantes sont davantage présentes, à l'inverse des espèces sensibles qui ne peuvent s'adapter. Les effets toxiques dépendent de la durée et de la concentration de l'exposition et varient selon les espèces et leur stade de croissance. (GC, 2017)

4.2.5 Effet du perchlorate au sol

Une fois déposé au sol, une partie du ClO_4^- est absorbée par les plantes grâce à l'humidité du sol, mais la grande majorité s'infiltre dans les plans d'eau. Il peut ainsi s'accumuler dans les tissus végétaux ou être maintenu en solution par les capillaires. Sous l'effet de sa présence généralisée dans l'environnement canadien, des quantités traces peuvent aussi pénétrer dans la chaîne alimentaire (GC, 2015 b). La demi-vie des ions ClO_4^- dans le sol est estimée à 52 h. (Sijimol et al., 2014)

4.3 Conséquences des retombées polluantes sur les milieux aquatiques d'eau douce

Les biomes d'eau douce sont exploités à de nombreuses fins, notamment pour l'irrigation, l'élevage, l'approvisionnement en eau potable et les loisirs, en plus de servir d'habitat à plusieurs organismes. Sous ce constat, les systèmes hydriques sont exposés à plusieurs sources de contaminations qui dégradent les milieux et amenuisent la biodiversité qu'ils recèlent. (Edokpayi, Odiyo, Popoola et Msagati, 2016)

De fait, les polluants rejetés dans l'environnement pénètrent à l'intérieur des plans d'eaux selon différentes voies, soient le ruissèlement, l'évacuation des eaux usées, les déversements et les dépôts de polluants atmosphériques. Ils sont ensuite emportés par le courant, dilués et, dans certains cas, transformés. Certes, les activités anthropiques induisent une forte surcharge chimique qui perturbe l'équilibre dynamique des écosystèmes en plus d'injecter de nombreux produits présentant un réel risque d'accumulation (GC, 2010 b).

Par exemple, plusieurs rapports de surveillance de la qualité de l'eau effectuée au parc *SeaWorld* aux États-Unis ont documenté des niveaux élevés d'arsenic, de cuivre et de phosphore causés par les feux d'artifice. Afin de contrer cette situation, le Système national d'élimination des rejets polluants (SNERP) a réglementé pour la première fois en Amérique du Nord les émissions d'origine pyrotechnique. Le permis SNERP fixe ainsi, pour ce parc, un maximum annuel de 150 spectacles et précise les exigences d'atténuation et de surveillance pour traiter des résidus chimiques dangereux. (Herzog, 2013)

Dans cet ordre d'idée, la présente section décrit les molécules susceptibles de se trouver dans les eaux subséquemment aux émissions pyrotechniques et détaille leurs effets sur ces milieux.

4.3.1 Effets des métaux traces dans l'eau

Les métaux traces font partie des polluants les plus notoires de l'eau et sont reconnus pour leur toxicité et leur persistance environnementale. Tout comme les POP, ils ont tendance à se bioaccumuler dans les tissus vivants à des concentrations pouvant compromettre les processus physiologiques normaux, de même qu'à des niveaux trophiques supérieurs par l'entremise de la chaîne alimentaire. Une faible qualité hydrique et sédimentaire des milieux lacustres peut générer un stress et une mort prématurée des invertébrés et des poissons qui y vivent. La présence de plans d'eau à proximité des sources d'émission pyrotechnique augmente ainsi les risques de contamination hydrique. En effet, les PM métalliques peuvent se déposer sur les eaux de surface et migrer vers les basfonds avant de s'adsorber fortement sur les sédiments. Ces derniers font alors fonction de puits d'accumulation et de source secondaire pour l'eau

et les biotes aquatiques. Ainsi, dans des conditions favorables, les métaux peuvent se resolubiliser dans la phase aqueuse et être à nouveau accessibles. Leur solubilité dépend de leur nature, du chimisme de la phase aqueuse (pH, potentiel redox, concentration en ligands) et des phases solides environnantes. La spéciation est quant à elle régie par le climat chimique du milieu. Cela dit, l'hydrosolubilité de la majorité des métaux est fortement augmentée par l'acidité. En tant que telle, les métaux traces sont immuablement stables en solution et cette propriété se définit par « la durée nécessaire pour qu'ils rencontrent un piège chimique qui les fixe » (Edokpayi et al., 2016; Lemièrre et al., 2001).

La quantité d'espèces métalliques dans les réseaux hydriques, de même que celle d'autres contaminants pyrotechniques, peut aussi être influencée par les conditions météorologiques comme les fortes pluies et les rafales. La pollution des cours d'eau situés près des aires de lancement est exacerbée par le ruissèlement de surface issu des précipitations impétueuses et de la fonte des neiges. Effectivement, les eaux pluviales peuvent capter et suspendre dans la phase aqueuse les contaminants préalablement adsorbés au sol, puis les transporter par écoulement jusque dans les milieux hydriques récepteurs. Un couvert asphalté ou compacté accentue ce phénomène et facilite le déplacement des masses d'eau, contrairement aux sols poreux non saturés où l'eau de pluie tend à percoler jusqu'aux nappes phréatiques. De plus, la fonte rapide des neiges suite aux effets combinés du soleil, des vents et des températures provoque d'importants ruissèlements pouvant saturer les sols et mobiliser les substances chimiques par lessivage. Ces eaux induisent rapidement une surcharge polluante dans l'environnement récepteur. Bien que les feux d'artifice soient rarement employés hors des saisons estivales, la fonte nivale peut remettre en circulation des contaminants d'origine pyrotechnique qui étaient encore jusque-là accumulés dans les sols. (Edokpayi et al., 2016; Lemièrre et al., 2001).

D'autre part, il est vu au chapitre 3 que la présence de puissants vents peut relarguer dans l'atmosphère une grande quantité de PM décantée, en plus de transporter pendant plusieurs jours et sur de longues distances les PM en suspension. Ces dernières peuvent alors se déposer sur les étendues des rivières, des lacs et des plans d'eau situés loin des sources d'émission. Ainsi, les polluants émis par les feux d'artifice peuvent catalyser la déplétion de milieux aquatiques sans que les sites de projections soient eux-mêmes en bordure d'un réseau hydrique.

Par ailleurs, l'évaporation des eaux en saison chaude et sèche entraîne la réduction du facteur de dilution des environnements aquatiques, donnant lieu à une augmentation des concentrations de contaminants. (Edokpayi et al.)

4.3.2 Effets du SO₂ et NO_x dans l'eau

Les effets écologiques des pluies acides sont plus visibles dans les milieux comme les cours d'eau, les lacs et les marais, si bien que la capacité d'un système aquatique à soutenir le biote est reliée à la causticité des eaux de surface. Selon la communauté scientifique, un lac devient acide lorsque le pH atteint 5,5, soit le seuil critique où les dommages aux organismes fluviatiles deviennent très prononcés. Le pH des lacs acidifiés peut s'abaisser à des plateaux aussi faibles que 4 à 4,5 unités. Cette chute de pH peut solubiliser des métaux traces (Al, Cd, Hg, Cu) et engendrer des effets toxiques, voire mortels, pour les poissons et autres biotes (MDDELCC, 1999). Cela dit, certains organismes supportent bien les eaux acides, mais la majorité y est très vulnérable et ne peut subsister dans un tel environnement. Une acidification des eaux entraîne donc l'élimination des populations les moins tolérantes et diminue la biodiversité des milieux touchés.

En somme, lorsque le pH atteint 5,5, 25 % des espèces de poissons meurent, et quand il descend près de 5, il ne reste plus que 25 % des populations d'origine. Les plantes sont substituées par des sphaignes et des mousses et seulement les insectes les plus tolérants persistent. En deçà de pH 5, seulement les plus gros individus survivent, mais disparaissent à la fin de leur cycle de vie car les œufs ne peuvent subsister (MDDELCC, 2004). À cet égard, une baisse de cations basiques dans les sols a un impact sur l'acidité des milieux aqueux et pose un risque dans le rétablissement de la diversité des espèces dans ces écosystèmes. (EC, 2004)

Le SO₂ est reconnu depuis longtemps comme le principal polluant atmosphérique en cause dans l'acidification des lacs de l'est du Canada. Il se dépose sous forme de SO₄²⁻ dans les milieux aquatiques et terrestres, comme vu à la section 4.2. Les émissions de NO_x diminuent aussi le pH, mais elles ont jusqu'à présent entraîné moins d'effet que le SO₂. Cela dit, le biote absorbe relativement peu de SO₄²⁻ et les jeunes sols dérivés de dépôts glaciaires, typiques des régions sensibles canadiennes, en absorbent légèrement. Leur réduction se produit à l'interface eau-sédiments des lacs tandis que l'hypolimnion anoxique décroît leur concentration, à condition que le sulfure réduit demeure enfoui dans les sédiments. Toutefois, des bilans indiquent qu'il y a davantage de SO₄²⁻ acheminés dans les eaux d'écoulement qu'il y en a qui pénètre dans le bassin versant sous forme de dépôts bruts. (EC, 2004)

Les variations régionales qui influencent l'évaporation, les précipitations, la température, etc. affectent les concentrations de nombreuses espèces chimiques retrouvées dans les eaux des lacs. Les dépôts

atmosphériques de SO_4^{2-} sont encore les principales causes de l'acidification des eaux de surface dans le sud-est du Canada (EC, 2004). Les effets de la causticité des milieux hydriques sont décrits comme suit :

- 1) La réduction de la diversité taxonomique des algues et des invertébrés;
- 2) La réduction de l'abondance des poissons et amphibiens et de leur distribution;
- 3) Les impacts induits sur les oiseaux aquatiques par la perturbation de leur réseau trophique.

Les réseaux trophiques dans les lacs dégradés par l'acidité deviennent plus primitifs, c'est-à-dire qu'un seul biote doté d'une tolérance accrue domine le milieu. Prospectivement, la combinaison des incidences liées aux conditions chimiques défavorables, la disparition de taxons sensibles à l'acidité, la perte des proies favorites, la réduction de la valeur nutritionnelle des proies restantes et les effets écotoxicologiques générés (ex. toxicité attribuable aux métaux) étendent les répercussions de l'acidification sur les producteurs primaires, comme les algues, jusqu'à des niveaux trophiques supérieurs (poissons, oiseaux aquatiques, etc.). (EC, 2015)

Les retombées de NO_3^- peuvent également modifier certains milieux lacustres. En plus d'acidifier le sol et réduire sa fertilité, le lessivage de NO_3^- peut augmenter le taux d'eutrophisation des lacs et des cours d'eau et ainsi perturber la qualité de l'eau potable. En effet, l'atteinte d'une quantité critique de composés azotés dans le sol engendre le largage des surplus sous forme de nitrate acide (ex. HNO_3), ce qui accentue l'acidification des eaux de surface à proximité (MDDELCC, 2004). Occasionnée par l'acheminement de PM atmosphériques, la pollution due à l'azote dans les eaux côtières est partiellement responsable du déclin des populations de poissons et de crustacés dans certaines régions. (US EPA, s. d.)

Parallèlement, les retombées acides semblent inhérentes à l'occurrence anormale de mercure dans certains écosystèmes aquatiques reculés. Dans les lacs et les milieux humides, le mercure se transforme en un composé organique bioaccumulable par les vivants. Or, les animaux sauvages et les oiseaux piscivores au sommet de la chaîne alimentaire le bioamplifient. En revanche, les concentrations de mercure mesurées dans les poissons, ainsi que celles de cadmium et de plomb, sont négativement liées au pH des lacs. (EC, 2004)

4.3.3 Effets du perchlorate dans l'eau

Le ClO_4^- est un puissant oxydant doté d'une grande solubilité et capable de se mobiliser dans les milieux aqueux. Il est cinétiquement stable et inerte, ce qui lui permet de persister pendant des années, voire des décennies, dans des conditions d'eau de surface et d'eau souterraine typiques. (Vella et al., 2015)

La contamination par le ClO_4^- est observée aux États-Unis, en Corée, au Japon, en Inde et en Chine. Sa détection dans les eaux américaines a alimenté les récentes évaluations par rapport à la source, la distribution et les processus biogéochimiques régissant le comportement du ClO_4^- dans les milieux aquatiques. Sa présence est mesurée dans de nombreuses espèces végétales et animales sauvages, y compris les amphibiens, les poissons et les petits mammifères près des sites de fabrication et de manutention du ClO_4^- , tels les manufactures de feux d'artifice (Sijimol et al., 2014). Ce composé est toutefois dégradé par l'action microbienne en milieu humide.

L'impact potentiel de cet ion sur l'homme et les écosystèmes est directement corrélé à sa mobilité et son atténuation dans l'environnement. Le sel de perchlorate (ex. KClO_4) est très soluble en solution aqueuse et sa dissociation mène à la formation d'ions spectateurs (K^+) et d'anions ClO_4^- . Ce dernier n'adhère que faiblement aux surfaces minérales et organiques, rendant alors les voies d'atténuation abiotique insignifiantes. En réalité, la déplétion du ClO_4^- dans l'environnement est efficacement médiée par les microorganismes anaérobies qui réduisent le ClO_4^- en Cl^- selon la séquence réactionnelle suivante : $\text{ClO}_4^- \longrightarrow \text{ClO}_3^- \longrightarrow \text{ClO}_2^- \longrightarrow \text{Cl}^- + \text{O}_2$. Ces organismes utilisent divers substrats organiques donneurs d'électrons, tels que le glucose, l'acétate, les huiles végétales et les C_{org} présents dans les sols et les sédiments. Cette transformation biologique est utilisée avec succès dans le traitement de l'eau potable et l'assainissement des eaux souterraines *in situ*. (Wilkin et al., 2007)

Les préoccupations actuelles proviennent du risque posé par son ingestion sur la santé. En effet, il est prouvé que le ClO_4^- interfère avec la production d'hormones thyroïdiennes nécessaires au métabolisme normal et au développement de la fonction mentale. Des concentrations élevées peuvent également représenter un danger pour les écosystèmes aquatiques. De surcroît, les poissons provenant de sites contaminés contiennent plusieurs milliers de parties par milliard (ppb) de ClO_4^- dans la région crânienne et des centaines de ppb dans les tissus. De plus, des évaluations histologiques récentes montrent que certains poissons exhibent des symptômes liés à une hyperplasie folliculaire thyroïdienne, une hypertrophie et une déplétion colloïdale à des concentrations de ClO_4^- aussi faibles que $100 \mu\text{g/L}$ pour une exposition de 30 jours (Vella et al., 2015).

4.3.4 Effets des POP dans l'eau

Les composés organochlorés et les POP peuvent se déposer dans les écosystèmes marins et d'eau douce par, entre autres, les rejets d'effluents, les dépôts atmosphériques et le ruissèlement. Comme ils sont hydrophobes, ils se lient fortement à la surface organique des particules formant les sédiments

aquatiques. Conséquemment, leur séquestration empêche leur circulation pour une période prolongée, mais favorise la formation de réservoirs d'accumulation. Nonobstant, une perturbation physique des sédiments peut occasionner leur réintroduction dans l'écosystème et la chaîne alimentaire, devenant potentiellement une source de contamination locale et même mondiale. (US EPA, 2009)

Concrètement, les POP se bioaccumulent dans les tissus adipeux d'espèces aquatiques pour ensuite se répandre dans la chaîne alimentaire par bioamplification vers les paliers trophiques supérieurs. Ils sont stables et très peu sensibles à l'oxydation, ce qui accentue leur résistance aux dégradations biologiques naturelles et exacerbe du même coup leur persistance environnementale (Olivier, 2015). Ils peuvent donc demeurer dans les milieux naturels des années, voir même des décennies. Il est aussi démontré que leur apport dans les eaux lacustres et littorales, plus particulièrement dans les Grands Lacs d'Amérique du Nord, est majoritairement dû aux précipitations atmosphériques. (GC, 2013)

Enfin, des études établissent un lien entre l'exposition aux POP et le déclin, les maladies et les anomalies d'un certain nombre d'espèces fauniques. À la lumière de ce qui précède, les anomalies comportementales et les malformations congénitales découvertes dans la faune des Grands Lacs et leurs environs ont guidé les scientifiques vers l'étude factuelle de l'exposition des populations humaines aux POP. Delà, des effets nocifs sur la santé reproductive, développementale, comportementale, neurologique, endocrinienne et immunologique sont répertoriés chez l'homme et associés aux POP. Leur absorption résulte principalement de l'ingestion d'aliments contaminés, mais peut aussi, à un degré moindre, provenir de la consommation d'eau et d'un contact direct avec certains composés chimiques. Chez les mammifères, les POP peuvent également être transférés par le placenta et le lait de la mère à l'enfant. Cela dit, quelques populations sont particulièrement exposées, notamment les peuples autochtones dont l'alimentation inclut de grandes quantités de poissons, de mollusques et de crustacés, en plus d'aliments locaux riches en graisses. (GC, 2013)

5. CRITIQUES DES RISQUES ASSOCIÉS À L'USAGE

Ce chapitre se veut une appréciation des risques liés aux activités pyrotechniques. Tout d'abord, les constats exposés dans les volets précédents sont synthétisés et mis en perspectives au moyen d'une discussion critique. Ensuite, une estimation des émissions annuelles de plusieurs contaminants pyrotechniques est présentée pour le Canada et les États-Unis, après quoi les limites ayant freiné les conclusions de cet essai sont précisées. Finalement, les perspectives d'avenir en ce qui a trait aux innovations environnementales de ce secteur d'activité sont exposées.

5.1 Constats

Les bilans s'appuient sur les renseignements recueillis dans les chapitres précédents et permettront de formuler des recommandations justes et pertinentes. Il est à préciser que les études insolées tout au long de cet essai sont réalisées par des équipes de recherches à travers le monde. De fait, la rareté des informations n'a pas permis d'évaluer la problématique entourant les feux d'artifice spécifiquement au Canada.

En somme, il semble raisonnable d'avancer que les émissions pyrotechniques engendrent des concentrations atmosphériques au-delà des valeurs normalement mesurées et dépassant, dans quelques cas, les seuils normés aux tableaux 2.2 et 2.3. Effectivement, la majorité des études citées à la section 3.1 relate des élévations considérables de PM aéroportées lors de feux, lesquelles peuvent demeurer en suspension jusqu'à un mois après les festivités. Cela entraîne l'amoncellement de fortes concentrations de PM_{2,5} sphériques sur une période de temps prolongée et accroît, dès lors, le rapport PM_{2,5}/PM₁₀. Plus de 25 ouvrages signalent des quantités moyennes de PM_{2,5} surpassant les NCQAA ainsi que les valeurs limites énumérées dans le RAA pour une durée de 24 h. Malgré qu'aucune législation canadienne ne considère les émissions de PM₁₀, au moins 20 recherches relatent des taux dépassant les NAAQS, aussi pour une durée de 24 h. Il est à réitérer que les études exposées au chapitre 3 ne sont pas menées au Canada, mis à part celle de Joly et al. Les concentrations recensées peuvent toutefois servir de bases comparatives pour les événements d'ampleur équivalentes. Cela dit, des taux de PM_{2,5} allant jusqu'à 10 000 µg/m³ sont mesurées par Joly et al. pendant l'International des Feux Loto-Québec à Montréal, soit la plus prestigieuse compétition de feux d'artifice au monde. Cette concentration est de loin la plus élevée parmi celles présentées dans cet ouvrage. D'autant plus, cette recherche dénote des augmentations atmosphériques de Pb et de Cr égales à 25 et 3 fois les valeurs de fond respectivement, et ce même si ces éléments sont interdits dans les artifices vendus au Canada. Il est alors justifié de se questionner sur les méthodes mises

en place par la DRE pour tester les explosifs importés sur le territoire canadien. Corolairement, un système de caractérisation, aléatoire ou systématique, plus performant doit être implanté en amont de toutes distributions commerciales.

Aussi, d'après les constats présentés au chapitre 3, ces particules recèlent des quantités anormalement élevées de métaux traces, d'ions, de C_e , de C_{org} et de composés organiques. Parallèlement, d'importants dégagements gazeux de SO_2 , NO_x , CO_2 et CO sont également observés et décrits à la section 3.3. Les taux de SO_2 et de NO_x (tableau 3.3) ne semblent toutefois pas dépasser les NCQAA, mais les seuils de concentrations sont donnés pour une durée d'une heure tandis que les recherches fournissent des mesures sur une durée de 24 h. Toutefois, une variété d'éléments sont détectés à des niveaux substantiels, plus particulièrement le Pb, Cu, Al, Ba, Sr, Sn, Mg et K. D'ailleurs, neuf études montrent des proportions de Cu et Zn plus hauts que ceux dictés dans le RAA pour 24 h. Il est néanmoins infaisable d'évaluer l'excès d'autres métaux inscrit dans la réglementation provinciale, car les normes sont établies pour des valeurs calculées sur 1 an. En revanche, sous les constats décrits à la section 3.2, il est fort probable que les émissions métalliques générées par les feux d'artifice aient un impact significatif sur les afflux atmosphériques à court terme. Des éléments plus toxiques pour l'environnement tel l'As, le Hg, le Pb et le Cr sont aussi détectés dans quelques recherches. De surcroit, des concentrations importantes de ClO_4^- sont mesurées dans les milieux adjacents et quelques études dénotent l'existence subséquente d'une certaine quantité de POP. L'émission de ces derniers est exacerbée par l'omniprésence de composés chlorés utilisés dans la fabrication d'un grand nombre de feux d'artifice, tout comme certains métaux comme le Cu, qui catalysent la formation de dioxines.

Dans cet ordre d'idées, il est reconnu que les événements pyrotechniques sont la cause des pires indices de la qualité de l'air sur l'île de Montréal et qu'à ces moments, les taux de PM sont beaucoup plus importants que ceux observés lors d'alertes au smog. Malgré ces faits, aucun financement n'a été octroyé à la ville afin d'investiguer sur les risques sanitaires et environnementaux associés aux feux, ce qui traduit le faible intérêt des paliers gouvernementaux. Dans cette portée, seuls quelques articles font état d'évaluations des menaces pour la santé directement liées à ce type d'émissions. Les résultats toxicologiques montrent que les $PM_{2,5}$ sont plus nocives que les PM_{10} et leur aspiration constituent un danger pour les observateurs. Toutefois, l'OMS précise que la présence de PM_{10} , habituellement formées de C_{org} , C_e , SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+ , à un niveau supérieur à $50 \mu g/m^3$ augmente les probabilités qu'elles soient inhalées profondément dans les poumons et génère des difficultés respiratoires chez les populations à risque. La composition chimique des particules (métaux traces, ions, POP, etc.) et leur taille ($PM_{2,5}$)

peuvent également exacerber leur toxicité et être particulièrement préoccupantes pour les personnes âgées, les enfants et les femmes enceintes.

La population n'est pas aux faits des dangers associés à ces émissions polluantes ni des types de contaminants qu'ils risquent d'inhaler. Au Québec, peu de mesures d'alerte sont instaurées en vue d'avertir les spectateurs qu'ils seront exposés à des concentrations de PM bien au-dessus des seuils limites. La plupart d'entre elles consistent seulement à prévenir le public au début des feux que la fumée pourrait les indisposer. Cela dit, l'observation de feux d'artifice est une activité souvent qualifiée de familiale, et la présence de jeunes enfants est courante. Les caractéristiques des émissions et la proximité des techniciens, des spectateurs et des interprètes sont aussi des critères importants qui augmentent les facteurs de risques, de même que les effets possibles sur la santé. Cependant, un événement uniquement constitué de feux aériens représente un potentiel d'exposition plus faible que ceux composés d'artifices de basse portée, de même que les festivités à l'intérieur d'espaces fermés, en raison de la dispersion plus rapide des polluants. En plus, la consommation de feux d'artifice destinés au grand public, soit des articles de faible portée, est considérablement supérieure à celle des feux d'affichage, comme lu à la section 1.3.4. Il est alors urgent que les autorités de santé publique s'informent davantage sur la composition et la concentration des émissions pour les articles vendus au détail, en plus d'investiguer rapidement sur les projections intérieures.

D'un autre côté, les émissions pyrotechniques peuvent perturber le fonctionnement naturel des écosystèmes en bouleversant l'équilibre chimique des milieux récepteurs en plus d'amoindrir la santé faunique et florale, bien que leurs effets à long terme ne soient pas encore bien évalués. Les feux d'artifice sont fréquemment projetés à proximité des plans d'eau, ce qui permet aux résidus de combustion, de même qu'aux débris de plastiques et de cartons, de tomber dans les eaux de surface. Il est alors envisageable d'estimer qu'un site de lancement régulièrement employé peut mener à une accumulation de contaminants dans les sols et les eaux adjacents, ou encore affecter les milieux reculés par le transport atmosphérique des polluants. À cet effet, la commission de la capitale nationale (CNN) a commandé en 2010 et 2011 deux rapports en vue d'évaluer l'empreinte environnementale des Grands Feux du Casino du Lac Leamy à Gatineau. Le rapport remis en 2010 conclut que « Les spectacles de feux d'artifice représentent une source de pollution » et que des taux de Cu et Pb mesurés dans la zone de dépôt des feux étaient supérieurs au seuil d'effet nocif recommandé par le CCME (Tremblay, 2015, 20 août). Le document note aussi une augmentation importante des concentrations de métaux dans les sédiments à proximité des aires de lancement par rapport aux sédiments du milieu avoisinant. À la lumière de ces

conclusions, il est probable que plusieurs secteurs similaires, soumis à des émissions équivalentes, présenteront également des signes de pollutions aquatique et terrestre, tels que détaillés aux sections 4.1 et 4.2. Or, pratiquement aucune autre étude de ce genre n'est menée ailleurs au pays et dans le monde, malgré les recommandations d'organismes environnementaux comme Sentinelles Outaouais pour effectuer des analyses de l'eau de surface avant et après chaque évènement. Il est alors essentiel de se questionner sur l'impact d'une telle émission à long terme et de conduire des évaluations environnementales systématiques.

Au Canada, les feux d'artifice ne sont pas soumis à l'obligation de détenir un certificat d'autorisation environnemental. À condition d'obtenir un permis émis par la DRE, les organisateurs et concepteurs de spectacles pyrotechniques à grand déploiement peuvent utiliser le nombre de bombes ainsi que la variété d'effets et de couleur qu'ils désirent. Nonobstant, selon la LQE,

« Il est interdit d'émettre, de déposer, de dégager ou de rejeter une matière dangereuse dans l'environnement ou dans un système d'égout, ou d'en permettre l'émission, le dépôt, le dégagement ou le rejet, à moins que l'opération ne soit réalisée en conformité avec la Loi sur la qualité de l'environnement. » (*Loi sur la qualité de l'environnement*)

L'expression matière dangereuse et ses propriétés est définie dans le Règlement sur les matières dangereuses (RMD). Selon ce dernier, une matière explosive est définie comme :

« Toute substance qui a été fabriquée en vue de produire un effet pratique explosif ou pyrotechnique, ou tout objet constitué d'une telle substance. » (*Règlement sur les matières dangereuses*)

Cela dit, les feux d'artifice ne figurent pas dans la liste des substances qui, conformément à leurs propriétés, sont associées à une matière dangereuse. De ce fait, ils sont exclus des dispositions législatives découlant de la LQE et aucun outil de mesure n'est actuellement en place afin de contrôler la quantité de rejets émis dans l'atmosphère. De surcroît, aucune limite n'est apposée sur le nombre de pièces pouvant être projetées pour un laps de temps donné et la LQE ne prévoit pas de concentrations seuils pouvant être diffusées par les contaminants contenus dans les coques. Parallèlement, l'Agence de protection de l'environnement américaine (US EPA) a instauré une disposition spéciale permettant aux États d'éviter une lecture élevée lors d'évènements qualifiés d'exceptionnels. Cette clause a d'abord été introduite pour garantir que les incidents imprévus, tels les feux de forêt ou les attaques terroristes, n'interfèrent pas avec les prélèvements atmosphériques d'un site. Toutefois, étant donné que l'US EPA classe les feux d'artifice du 4 juillet comme une tradition culturelle particulière, les organismes publics peuvent demander

l'élimination définitive au registre de tout enregistrement anormalement élevé (Leibenluft, 2008). À l'évidence, cette clause reflète la faible prise en charge de ce secteur d'activité.

D'autre part, aucune restriction quant à l'emplacement des aires de lancement n'est indiquée afin de considérer les milieux naturels à proximité et leur capacité réceptrice. Le permis d'usage requiert toutefois que les espaces soient nettoyés de tout débris après chaque soirée. À cet égard, les inspecteurs du MDDELCC font quelques visites inopinées annuellement, or il est tout de même peu fréquent qu'ils se déplacent pour évaluer l'état des lieux. Ce manque de surveillance peut alors mener à un nettoyage superficiel et résulter à une accumulation de déchets contaminés. Cela dit, quelques municipalités interdisent totalement les feux d'artifice à l'usage des consommateurs sur leur territoire, tandis que d'autres les permettent, mais règlementent les lieux d'utilisation. Ces mesures sont cependant prises, dans la majorité des cas, par mesure de sécurité et non par souci environnemental.

En somme, il ne s'agit pas de dire qu'un seul feu d'artifice aura des conséquences dévastatrices sur l'environnement, la santé ou la biodiversité, mais que la répétition de ces spectacles peut entraîner des taux de contamination anormalement élevés à court et à long terme. En dépit du faible nombre d'études traitant de ce sujet, plusieurs d'entre elles constatent de réels dangers associés à ce secteur d'activité et soulignent l'urgence de s'y attarder rapidement.

5.2 Estimation des émissions annuelles

Afin d'approfondir les constats émis à la section 5.1, il est possible d'estimer les émissions annuelles générées par le secteur de la pyrotechnie en se basant sur les facteurs d'émission (FE). Les résultats sont présentés au tableau 5.1.

Dans le cas présent, le FE est défini comme le ratio entre la quantité d'un contaminant émis par un feu d'artifice et la masse totale de l'artifice. Les FE des métaux contenus dans les PM sont expérimentalement calculés comme suit (Camilleri et Vella, 2015) :

$$FE_{\text{métal}} = \frac{(V_{\text{chambre}}/V_{\text{échantillon}}) \times M_{\text{métal}}}{M_{\text{FA}}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Où V_{chambre} = Volume de la chambre d'expérimentation

$V_{\text{échantillon}}$ = Volume de l'échantillon d'air prélevé

$M_{\text{métal}}$ = Masse du métal collecté dans les échantillons de PM

M_{FA} = Masse du feu d'artifice

Les FE métalliques employés dans cette section sont tirés des recherches conduites par Croteau et al. pour quatre différentes pièces pyrotechniques à basse portée, soit les œufs de dragon, les rubans, les chandelles romaines et les fontaines (annexe 2). En raison du manque d'évidences dans les ouvrages scientifiques, les valeurs utilisées dans cet essai sont la moyenne de tous les FE calculés pour chaque élément. Par contre, les FE pour les gaz et les PM sont relevés des évaluations de l'Office national de l'eau des Pays-Bas (Netherlands national water board [NNWB], 2008). Les bases hypothétiques sur lesquelles sont mesurées ces données sont cependant inconnues.

Ainsi, le tableau 5.1 présente l'extrapolation des émissions pyrotechniques canadienne et américaine en 2016. La quantité de feux d'artifice consommé au Canada est issue des importations totales sur le territoire, soit 3900 t, car aucune autre donnée liée au nombre global d'articles utilisés ou vendus dans le pays n'est disponible. Il est toutefois légitime de s'attendre à un nombre beaucoup plus élevé en réalité. D'un autre côté, la somme d'artifices usée aux États-Unis pour l'année 2016 est évaluée à 122 000 t. Les émissions annuelles de chaque contaminant sont calculées comme suit :

$$FE = \frac{\text{Contaminants } X_{(g)}}{FA_{(Kg)}} \quad (\text{calculé expérimentalement}) \quad \text{Eq. 5.2}$$

$$\frac{\text{Contaminants } X_{(g)}}{FA_{(Kg)}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = \frac{\text{Contaminants } X_{(kg)}}{FA_{(t)}} \quad \text{Eq. 5.3}$$

$$\frac{\text{Contaminants } X_{(kg)}}{FA_{(t)}} \times \text{Qté de FA consommée en 2016}_{(t)} = \text{Qté de contaminants X émis en 2016}_{(kg)} \quad \text{Eq. 5.4}$$

La dernière colonne du tableau désigne la proportion (%) des émissions pyrotechniques pour quelques contaminants selon les quantités totales rejetées au Canada en 2016 (GC, 2016).

Tableau 5.1 Extrapolation des émissions pyrotechniques au Canada et aux États-Unis en 2016

Contaminants	États-Unis (t)	Canada (t)	Pourcentage des émissions canadiennes (%)
TSP	13399	428	0,1
PM_{2,5}	6337	203	*
PM₁₀	12190	390	*
K	4122	132	*
Mg	416	13	*
Ba	285	9,1	*
Na	55	1,8	*
Ca	48	1,5	*
Cu	331	11	4
Al	145	4,6	5
Pb^a	1015	0,0078	0,006
Ga	63	2	*
Sr	48	1,5	*
Zn	30	0,94	0,3
Fe	24	0,77	*
Bi	20	0,65	*
P^a	3,3	0,043	0,03
Mn	3,5	0,11	0,1
Ti	3,1	0,1	*
Cr^a	4,6	0,0066	0,02
Sn	0,92	0,029	*
Si	25	0,79	*
Cu⁶⁺	0,7	0,022	*
Rb	0,63	0,02	*
Sb	0,22	0,0071	0,3
V	1,9	0,059	0,1
Te	0,31	0,01	*
As	0,16	0,0051	0,01
Cd	0,16	0,0052	0,1
CO₂	5277	169	*
CO	872	28	0,003
SO₂	368	12	0,001
NO_x	32	1	0,0002

*Donnée non disponible

^a Les plus faibles FE calculés sont utilisés pour ces métaux, au Canada, car ils y sont interdits.

Compte tenu de la législation encadrant les composés autorisés dans la fabrication des feux d'artifice au Canada, les facteurs relatifs à l'As, le Pb, le Cr et le P semblent obsolètes. Il est toutefois constaté à la section 5.1 que certaines quantités se retrouvent malgré tout dans l'environnement et s'accumulent dans les sédiments adjacents. D'autant plus, il est possible d'observer de légères concentrations à l'intérieur des PM émises dues, entre autres, aux impuretés dans les procédés de confection, tel que vu au chapitre 1. Par conséquent, les FE utilisés pour le Pb, le Cr et le P proviennent des plus faibles valeurs calculées par Croteau et al. (annexe 2). À l'inverse, les métaux fréquemment employés dans les mélanges pyrotechniques, comme le Sr, Fe, Ti, Al, Be, Ba, Cu, Cl, Cs ainsi que les cations basiques Mg^{2+} , K^+ et Na^+ , risquent d'être rejetés en grandes quantités. Or, le tableau 5.1 montre que les émissions d'artifices contribuent de manière négligeable aux émissions atmosphériques nationales pour les métaux traces. De plus, les quantités de gaz émis au Canada et aux États-Unis importent pour moins de 0,01 % des concentrations dissipées annuellement dans ces deux pays. Les contributions nationales de ces derniers sont donc triviales. Cependant, le potentiel de formation de PCDD/F et de composés organochlorés, en plus de la courte période de temps à l'intérieur duquel se produisent les émissions polluantes, pourraient entraîner des niveaux élevés de ces substances près des zones de projection.

Cela dit, les émissions annuelles canadiennes de plusieurs métaux n'ont pas été repérées dans les textes gouvernementaux et il est donc impossible de calculer la proportion de ces derniers dans les rejets nationaux. Qui plus est, aucune estimation ne peut être dérivée pour d'autres polluants où les FE sont inexistantes et la quantité d'artifice utilisée pour les calculs (3900 t) est sans doute plus faible que la valeur réelle.

Les FE ici employés doivent toutefois être utilisés à titre indicatif, car ils ne sont pas exacts et ne sont qu'une moyenne des FE de quelques types d'artifice. Il est aussi important de préciser qu'une multitude de feux distincts sont projetés lors d'un spectacle et que chaque pièce ne rejette pas la même quantité de contaminants.

5.3 Limites

Dans l'ensemble, les renseignements repérés dans le corpus littéraire ne sont pas suffisants pour développer l'inventaire intégral des rejets pyrotechniques. Cela résulte essentiellement de données ambiantes insuffisantes, de l'absence de FE complets et des mesures spatiotemporelles lacunaires. Dans cette portée, les études environnementales sur les feux d'artifice ne peuvent que se concentrer sur des situations uniques en raison de la rareté du phénomène. Il est donc difficile de comparer les résultats entre

les différents pays sous l'effet des conditions variables et non reproductibles entre chacun des événements. De surcroît, les recherches ne montrent aucune normalisation quant aux méthodes d'échantillonnage, aux procédés d'analyse et à la distance séparant les stations de collectes des aires de projections.

D'ailleurs, les concentrations mesurées diffèrent d'une étude à l'autre en raison du grand nombre de mélanges chimiques retrouvés sur le marché pour créer les divers effets (couleurs, scintillement, effets sonores, etc.). Or, le choix des couleurs a un impact considérable sur la nature des composés métalliques émis dans l'environnement. De plus, les conditions uniques de ces événements rendent complexe la comparaison des résultats et freine ainsi les avancées scientifiques nécessaires pour la sauvegarde des biomes. C'est pourquoi les taux d'augmentation, soit les rapports des concentrations avant et après les affichages, sont présentés au chapitre 3.

Enfin, les études s'intéressant aux risques sanitaires associés aux feux d'artifice sont clairsemées et incomplètes, ce qui empêche la formulation de conclusions convaincantes et réalistes. Aussi, pratiquement aucun document n'évalue les effets sur les milieux naturels. Il est alors presque impossible de connaître le véritable impact des polluants émis et l'ampleur de la contamination près des sites exposés tant que cette situation n'est pas mieux documentée.

5.4 Perspectives d'avenir

À la suite de pressions formulées par certains secteurs d'activité, de nouvelles technologies plus respectueuses de l'environnement font peu à peu leur entrée sur les scènes internationales depuis les 20 dernières années.

Tout d'abord, l'entreprise américaine *DMD Systems* produit actuellement une ligne de feux d'artifice sans perchlorates, qui contiennent moins d'un dixième de la quantité de baryum normalement ajoutée dans les articles traditionnels. Cette méthode utilise la nitrocellulose comme combustible et les nitrates comme agent oxydant, éliminant ainsi complètement les perchlorates. Les sels de métaux alcalins et alcalinoterreux de composés riches en azote comme le bis (1H-tétrazol-5-yl) hydrazine se sont également révélés plus écologiques, en plus d'autres additifs appropriés, tels les sels de 1H-tétrazole, le tétrazolate de strontium pentahydraté et le tétrazolate de baryum (Sijimol et al., 2014). La réaction qui s'en suit ne produit que des gaz stables et réduit considérablement l'émission de PM atmosphériques, principalement les oxydes métalliques et le chlorure de potassium. Ces feux dégagent aussi moins de fumée, rendant alors les couleurs plus visibles pour le public. En conséquence, la quantité de métaux traces peut être réduite

considérablement, soit de 60 %, tout en suscitant le même effet visuel que les feux d'artifice classiques. De plus, ces nouvelles formulations peuvent créer des nuances telles que des bleus et des rouges plus profonds, qui étaient jusque-là impossibles à produire. Bien que ces feux d'artifice « verts » soient plus propres et plus surs, les normes législatives peu contraignantes et la faible documentation des risques sanitaires freinent les demandes. Jusqu'à présent, les versions écologiques sont utilisées dans de nombreux lieux fermés et dans certains parcs thématiques affichant des projections quotidiennement, comme *Disneyland*. Cela dit, ces nouveaux dispositifs sont beaucoup plus dispendieux que leurs homologues traditionnels. Or, les produits en provenance de Chine demeurent les articles de choix pour la majorité des organisateurs qui veulent réduire les couts. (Yarett, 7 janvier 2009).

D'autre part, des recherches menées en Inde ont noté que la réduction de taille des particules jusqu'aux proportions nanométriques, à l'intérieur de la poudre éclair, diminuait considérablement la quantité des émissions. En effet, l'augmentation de la surface de contact accentue les vitesses réactionnelles et provoque la même intensité de bruit et d'illumination, mais avec des concentrations chimiques plus faibles. Il a aussi été observé lors d'un test qu'un feu d'artifice ne nécessitait que 25 % de poudre éclair pour produire le même niveau sonore. En plus, les émissions d'artifices composés à 100 % de poudre éclair nanométrique montrent des réductions de plus de 60 % des concentrations d'aluminium et de SO_2 . Toutefois, les nanoparticules ont des températures de combustion plus faible et sont plus sensibles aux impacts et à la friction, accentuant les risques accidentels d'explosion. Elles pénètrent également plus facilement dans les voies respiratoires et exacerbent les dangers de maladies pulmonaires. Leur cout est aussi bien au-delà de celui des articles classiques. Les auteurs stipulent cependant que des méthodes de productions et des techniques de manipulation plus sûres risquent de se développer à mesure que les rendements augmenteront. (The chemical engineer [TCE], 2014)

Parallèlement, une recherche s'est penchée sur les propriétés oxydantes des sulfates métalliques, sous forme de $\text{PM}_{2,5}$, en les associant à des nanoparticules d'aluminium. Ces nanoparticules enrichies sont particulièrement insensibles au frottement, peu vulnérables aux chocs et visiblement moins sensibles aux étincelles que leurs homologues préparées à partir d'oxydes métalliques. Elles se caractérisent aussi par des chaleurs de réaction très élevées et des vitesses réactionnelles accrues. Ces nanoparticules ont l'avantage d'être non-toxique et moins dispendieuses que les nanoparticules d'aluminium classiques. Ces propriétés sont alors employées pour l'allumage des poudres propulsives ou encore pour amorcer la détonation des explosifs secondaires. Des résultats similaires ont été obtenus avec les sulfites (SO_3^{2-}), les thiosulfates ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) et les peroxodisulfates ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$). Les perspectives qu'ouvrent ces nouveaux matériaux

énergétiques en matière de recherche fondamentale et d'applications industrielles intéressent différents domaines de la chimie, de la physique, de la biologie, de l'environnement et du développement technologique durable. (Centre national de la recherche scientifique [CNRS], 2015)

Qui plus est, une étude basée sur l'élaboration de charges propulsives non soufrées offre aussi une nouvelle avenue intéressante pour le secteur pyrotechnique. La charge améliorée est composée de KClO_4 (70 %), de phtalate acide de potassium ($\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_5$) (10 %), de C (11 %), de ferrocène ($\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{Fe}$) (1 %), de résine phénolique (7 %) et de stéarate de calcium ($\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{CaO}_4$) (2 %). Elle est moins sensible que la poudre noire, offre une excellente performance de stockage et possède un grand potentiel d'application. (Sun, Han, Du, Li et Cong, 2017)

Enfin, la substitution graduelle des feux d'artifice par des jeux de lumière et des projections appuyées par les avancées technologiques, comme les drones, pourrait être une voie envisageable pour les festivals et les parcs d'attractions.

6. RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce chapitre est de proposer des recommandations en vue de diminuer efficacement l'impact environnemental des feux d'artifice et d'accroître la conscientisation sociale à l'égard de ce secteur d'activité, au Québec et au Canada.

6.1 Recommandation 1 : renforcer le cadre réglementaire

Avec les problématiques environnementales qui se complexifient, les pouvoirs gouvernementaux se doivent de cibler des normes stratégiques et durables en plus d'être en mesure de traduire les résultats de recherches en politiques novatrices. Or, afin de contrôler les émissions pyrotechniques, il est nécessaire que les paliers fédéral et provincial élaborent des lignes directrices plus strictes lors d'évènement, comme suit :

- Imposer un nombre maximal de bombes pouvant être projetées;
- Limiter les quantités de feux d'artifice pour chaque couleur d'émission afin d'éviter l'accumulation d'une espèce métallique spécifique;
- Ne permettre aucun lancement sur l'eau ou à moins de 100 m d'un cours d'eau;
- Faire une étude d'impact environnementale si un site de lancement est situé à l'intérieur d'un milieu naturel;
- Interdire les feux de 22 h à 6 h afin de limiter la pollution sonore;
- Instaurer une politique de feux hivernaux pour limiter le taux de contaminants dans les eaux de ruissèlement. Cela dit, un nombre plus faible de bombes devrait être permis durant cette période ou même interdire tous les spectacles pyrotechniques l'hiver;
- Mettre en place un arrêt réglementaire dans chaque municipalité pour interdire les feux d'artifice en cas d'épisode de pollution, comme le smog;
- Resserrer les méthodes d'analyse pour déceler les composés à l'intérieur des feux d'artifice qui s'introduisent au Canada.

6.2 Recommandation 2 : imposer un pourcentage de pièces d'artifice sans perchlorate pour tous les spectacles à grand déploiement

Il est nécessaire d'employer des alternatives plus sûres et plus propres pour protéger l'environnement des effets à long terme des feux d'artifice. Cela dit, toutes projections destinées à un grand public devraient au minimum contenir 25 % d'artifice sans perchlorate. Cela permettrait d'atténuer la contamination des

eaux et des sols des secteurs avoisinants et diminuerait les risques écologiques. Ce pourcentage devrait augmenter d'année en année afin qu'éventuellement, aucun article ne renferme de perchlorate.

6.3 Recommandation 3 : augmenter la surveillance et le suivi environnemental dans les sites d'exposition

Des études de surveillances supplémentaires sont essentielles pour identifier les substances émises et leur concentration atmosphérique. Pour ce faire, une caractérisation des sols, des eaux de surface, des eaux souterraines et des sédiments près des sites de projection pyrotechnique à grand déploiement doit être effectuée régulièrement.

De fait, suite à l'examen des ouvrages scientifiques, il est flagrant que de plus amples recherches sont essentielles en vue de consolider les données probantes et les spéculations actuelles. Très peu de documents canadiens traitent de ce sujet et plusieurs questions persistent encore chez les citoyens, à savoir si les spectacles pyrotechniques représentent réellement une source de pollution. Cela dit, les variations atmosphériques dues à la combustion de pièces d'artifice, comme l'augmentation et l'altération chimique des PM atmosphériques, la présence dominante de PM_{2,5} et le rejet de gaz, accentuent substantiellement les risques pour la santé et influent sur la pérennité des milieux naturels. Une surveillance accrue de la qualité de l'air pendant les périodes de feux devrait contribuer à éviter les problèmes de santé. D'autant plus, que très peu d'articles portent sur l'impact des feux d'artifice sur les sols, la végétation et les milieux aquatiques. Les concentrations d'espèces chimiques et de métaux lourds déposés dans les écosystèmes après les déflagrations doivent donc être nationalement évaluées afin d'éviter une surcharge polluante dans les milieux déjà précaires. Cela est nécessaire pour comprendre les risques liés aux feux d'artifice et sensibiliser la communauté à l'aide de données fondées.

6.4 Recommandation 4 : élaborer une table exhaustive des facteurs d'émission pyrotechniques ainsi qu'une base de données accessible à la population

Il est primordial d'obtenir l'estimation des émissions pour un événement donné en s'appuyant sur les concentrations massiques réelles de chaque contaminant rejeté. Pour ce faire, les FE des substances émises pour l'ensemble des articles pyrotechniques doivent être mesurés à partir d'une méthodologie reproductible et insérés dans une table de données. Or, ces FE permettront de calculer précisément les taux et la nature des rejets atmosphériques d'un événement, en plus d'estimer les niveaux d'exposition lorsqu'ils sont combinés à un outil de modélisation atmosphérique. Ainsi, il serait possible d'instaurer des mesures de précautions et d'informer les populations à risque au sujet des dangers potentiels. Par exemple, les travailleurs œuvrant dans le domaine devraient alors être munies d'un appareil de protection

respiratoire lorsque les niveaux d'exposition estimés approchent les valeurs de seuil limite. L'identification des risques potentiels est ainsi nécessaire pour promouvoir la santé et la sécurité de la population à proximité des zones de lancement, en plus de prévoir des dispositifs de protection environnementale.

6.5 Recommandation 5 : créer un système d'alerte de santé publique

Il est important que les villes et municipalités émettent fréquemment des alertes de santé publique par l'intermédiaire des médias et d'autres systèmes de communication quant à l'évolution de la qualité de l'air, surtout lorsque celui-ci est très bas.

En ajout aux alertes, il serait essentiel de transmettre des conseils sanitaires pour épauler les individus vulnérables, en particulier ceux qui éprouvent des problèmes cardiaques, respiratoires et d'asthme. Ainsi, les avis doivent être accompagnés de recommandations stipulant que les personnes sensibles, principalement les individus souffrant d'affections respiratoires, doivent éviter une forte exposition afin de ne pas exacerber leur maladie. Une sensibilisation accrue de ces groupes à risque devrait réduire la morbidité et le nombre d'hospitalisations.

6.6 Recommandation 6 : mise sur pied d'une campagne de sensibilisation

La sensibilisation au sein d'une communauté est d'une importance cruciale. Toutefois, pratiquement aucune ville ne renseigne les citoyens des impacts de l'utilisation des feux d'artifice et il serait recommandé d'ajouter ce volet dans leurs activités annuelles. Pour ce faire, il est suggéré que les instances municipales publicisent de l'information sur les pratiques alternatives aux feux d'artifice, les effets liés à leur emploi et la liste des composés pouvant être émis. Les modes de communications doivent être multiples et les services internet et postaux devraient être priorisés.

Cela dit, il serait nécessaire d'intensifier la campagne publique en tirant parti du réseau écolier, des collèges et des universités en plus d'impliquer la société médicale afin d'exposer les risques sanitaires, ce qui ajouterait de la crédibilité. Des séances d'information, telles que des conférences, peuvent aussi s'avérer bénéfiques pour accroître le savoir des citoyens et conscientiser davantage les personnes à risques. Les municipalités devraient également promouvoir l'idée d'une célébration communautaire et décourager l'utilisation de feux d'artifice domestique. Ainsi, il serait préférable que les conseils municipaux et le MDDELCC s'impliquent conjointement dans la diffusion d'information à travers les différents médias afin de contribuer à une vision de concordance. De ce fait, des dépliants éducatifs pourraient être envoyés à la population au début de chaque saison estivale, de même qu'aux spectateurs lors de grands évènements.

En outre, il est recommandé qu'au moins un employé municipal soit disponible afin de répondre aux questions des citoyens relativement aux feux d'artifice, par téléphone ou par courriel. Cela dit, peu d'informations sont accessibles au sujet des comportements et des acquis des citoyens. Il est donc recommandé d'effectuer des sondages pour déterminer plus amplement ce niveau de connaissances et de publier les résultats sur les sites gouvernementaux.

Enfin, la sensibilisation aux impacts sur la santé et l'environnement aide les individus à prendre des décisions éclairées en ce qui concerne l'utilisation de pièces pyrotechniques et à faire pression sur le marché pour développer de meilleures technologies.

CONCLUSION

Les feux d'artifice font désormais partie intégrante de plusieurs festivités et leur déploiement est symbole de joie et rassemblement. Ce n'est toutefois que depuis quelques années que la communauté scientifique se penche sur les effets possibles de ces émissions.

Or, l'objectif général de cet essai était d'évaluer l'impact des feux d'artifice sur l'environnement en se basant sur un corpus littéraire détaillé et exhaustif. Afin d'y parvenir, il a tout d'abord été question d'exposer les principes de fonctionnement des bombes aériennes et leurs compositions. Or, il est observé que plusieurs substances chimiques sont utilisées pour créer des couleurs variées, de même que des effets visuels et sonores, et que ces derniers sont expulsés par voie de combustion. Par la suite, les usages, les évidences se rapportant à la consommation canadienne et mondiale ainsi que la description de plusieurs événements d'envergures ont permis de dresser un portrait de ce secteur d'activité. Cela dit, les ventes mondiales d'exportations de feux d'artifice se sont élevées à 1,04 G\$ en 2016, avec la Chine en tête de file. Subséquemment, il est présenté que la législation fédérale et provinciale n'encadrerait que très peu l'utilisation de pièces pyrotechniques lors d'événements de grande envergure, et que pratiquement aucune norme environnementale n'était en place. Toutefois, plusieurs municipalités interdisent l'emploi d'articles destinés aux consommateurs sur leur territoire afin de limiter les risques de blessure.

D'autre part, le volet le plus important de ce document était la présentation des composés toxiques relâchés dans l'environnement. Les données insérées dans ce chapitre relèvent principalement de 49 articles scientifiques réalisés par des chercheurs à travers le monde et qui sont communément utilisés comme cadre de référence dans plusieurs ouvrages se rapportant aux feux d'artifice. Ces études soulèvent les risques des rejets pyrotechniques pour la santé et exposent des données quant aux émissions de composés organiques, de HAP, de C_e et C_{org} , d'ions, de métaux, de TSP, de PM_{10} et de $PM_{2,5}$. Ils mentionnent tous des variations atmosphériques d'un ou plusieurs des constituants cités précédemment. Ainsi, plusieurs auteurs recommandent d'investir davantage dans les recherches environnementales et pressent les dirigeants d'amasser un éventail de données plus complet.

Suite à ces attestations, il a été possible de déceler les impacts probants des feux d'artifice sur les eaux, les sols et l'atmosphère, tout en exhibant les conséquences pour la santé. Cet ouvrage a donc permis de déterminer que les émissions pyrotechniques ont le potentiel de poser une réelle menace pour la pérennité de l'environnement. Or, sous ces réalisations, il est légitime d'avancer que l'objectif principal de

cet essai a été atteint. Néanmoins, la carence d'évidences et de recherches portant sur ce sujet freine les conclusions quant aux impacts réels des feux d'artifice.

Cela dit, les recommandations formulées au chapitre 6 visent à diminuer efficacement l'impact environnemental et sanitaire des artifices et à augmenter les niveaux de connaissance de la population. Ces recommandations portent sur le renforcement de la législation, l'utilisation de pièces pyrotechniques moins dommageables, l'augmentation du nombre de recherches scientifiques, l'analyse de facteurs d'émission complets, la création de systèmes d'alerte sanitaire et la mise en place d'une campagne de sensibilisation.

En conclusion, la répétition de spectacles pyrotechniques peut entraîner des taux de contamination anormalement élevés à court et à long terme. Bien que peu d'études traitent de ce sujet, plusieurs d'entre elles constatent de réels dangers associés à ce secteur et soulignent l'urgence de s'y attarder rapidement. Cependant, les renseignements repérés dans le corpus littéraire ne sont pas suffisants pour développer un inventaire complet des rejets pyrotechniques. Afin de pallier à cette réalité, il est primordial d'entamer promptement des analyses environnementales et d'inciter la population à s'investir collectivement face à cette situation dissimulée. Ainsi, de nouvelles technologies plus propres pourraient être davantage utilisées suite aux pressions sociales et gouvernementales.

RÉFÉRENCES

- Adon. (2011). *Étude des concentrations de gaz atmosphériques et estimation des flux de dépôt sec à l'échelle des principaux écosystèmes africains* (Thèse, Université de Toulouse, Toulouse, France). Repéré à https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00650079/file/Adon_these_manuscrit_2011.pdf
- Agrawal, A., Upadhyay, V. K. et Sachdeva, K. (2011). Study of aerosol behavior on the basis of morphological characteristics during festival events in India. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3640–3644.
- Aksu, A. (2015). Sources of metal pollution in the urban atmosphere: A case study, Tuzla, Istabil. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(79), 1-10.
- Alenfelt, P. (2000). Chemical analysis of consumer fireworks. *Journal of Pyrotechnics*, 11, 11-15.
- Aljahdali, M. (2008). Sulfur dioxide (SO₂) accumulation in soil and plant's leaves around an oil refinery: A case study from Saudi Arabia. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(1), 84-88.
- Ambade, B. et Ghosh, S. (2013). Characterization of PM₁₀ in the ambient air during Deepawali festival of Rajnandgaon district, India. *National Hazards*, 69(1), 589–598.
- American pyrotechnics association. (APA) (s. d.). Industry facts and figures. Repéré à <http://www.americanpyro.com/industry-facts-figures>
- Barman, S. C., Singh, R., Negi, M. P. S. et Bhargava, S. K. (2007). Ambient air quality of Lucknow city (India) during use of fireworks on Diwali Festival. *Environmental Monitoring and Assessment*, 137, 495–504.
- Beaudry, F. (2017). Declare your independence from toxic fireworks pollution. Repéré à <https://www.thoughtco.com/toxic-fireworks-pollution-1204041>
- Bluewin. (2015). Visite à Liuyang, capitale mondiale des feux d'artifice. Repéré à <https://www.bluewin.ch/fr/infos/faits-divers/2015/12/29/visite-a-liuyang--capitale-mondiale-des-feux-dartifice.html>
- Brain, M. (s. d.). Fireworks displays. Repéré à <http://science.howstuffworks.com/innovation/everyday-innovations/fireworks2.htm>
- Brainjet. (s. d.). Biggest and best fireworks displays around the world. Repéré à <http://www.brainjet.com/places/1282/11-biggest-and-best-fireworks-displays-around-the-world/>
- Brunning, A. (2013). *The chemistry of fireworks*. Repéré à <http://www.compoundchem.com/?s=fireworks>
- Cameron, D. (2008, 19 juillet). Feux d'artifice : un risque pour la santé. *La Presse*. Repéré à <http://www.lapresse.ca/actualites/200809/08/01-657520-feux-dartifice-un-risque-pour-la-sante.php>
- Camilleri, R. et Vella, A. J. (2010). Effect of fireworks on ambient air quality in Malta. *Atmospheric Environment*, 44(35), 4521–4527.

- Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique. (CITEPA). (2017). Poussières en suspension. Repéré à <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/poussieres-en-suspension>
- Centre national de la recherche scientifique (CNRS). (2015). Les sulfates pour des matériaux énergétiques « verts ». Repéré à http://www.cnrs.fr/inc/communication/direct_labos/spitzer3.htm
- Chang, S. C., Lin, T. H., Young, C. Y. et Lee, C. T. (2011). The impact of ground-level fireworks (13 km long) display on the air quality during the traditional Yanshui Lantern Festival in Taiwan. *Environmental Monitoring Assessment*, 172(1-4), 463–479.
- Chatterjee, A., Sarkar, C., Adak, A., Mukherjee, U., Ghosh, S. K. et Raha, S. (2013). Ambient air quality during Diwali festival over Kolkata- a mega-city in India. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(3), 1133–1144.
- Chemical legislation european enforcement network. (CLEEN) (2012). *Europop final report*. Repéré à <file:///C:/Users/UP/Downloads/Dokument1.pdf>
- Cheng, Y., Engling, G., He, K., Duan, F., Du, Z., Ma, Y., Liang, L., Lu, Z., Liu, J., Zheng, M. et Weber, R. J. (2014). The characteristics of Beijing aerosol during two distinct episodes: Impacts of biomass burning and fireworks. *Environmental Pollution*, 185, 149–157.
- Coast Law Group. (CLG) (2011). *Summary of substantial evidence of potentially significant water and air quality impacts from fireworks displays in the city of San Diego*. Repéré à <https://ecocerf.files.wordpress.com/2012/01/water-and-air-quality-summary-and-exhibits.pdf>
- Conseil canadien de la sécurité (CCS). (s. d.). À chacun son métier, notamment en pyrotechnie. Repéré à <https://canadasafetycouncil.org/fr/la-securite-de-la-communaute/chacun-son-metier-notamment-en-pyrotechnie>
- Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME). (2017). L'Air au Canada. Repéré à <http://airquality-qualitedelair.ccme.ca/fr/>
- Croteau, G., Dills, R., Beaudreau, M. et Davis, M. (2010). Emission factors and exposures from ground-level pyrotechnics. *Atmospheric Environment*, 44(27), 3295–32303.
- Dhasarathan, P., Theriappan, P. et Ashokraja. (2010). Microbial diversity in firework chemical exposed soil and water samples collected in Virudhunagar district, Tamil Nadu, India. *Indian Journal of Microbiologie*, 50, 46-49.
- Dayah, M. (1997). Dynamic periodic table. Repéré à <https://www.ptable.com/about.html>
- De Antonis, K. (2010). *Fire*. Repéré à <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/highschool/chemmatters/articles/bytopic/oxidationandredox/chemmatters-oct2010-fireworks.pdf>
- Deka, P. et Hoque, R. R. (2014). Incremental effect of festive biomass burning on wintertime PM₁₀ in Brahmaputra Valley of northeast India. *Atmospheric Research*, 143, 380–391.
- Dictionnaire de l'Académie française. (1932). Pyrotechnie. Repéré à <http://atilf.atilf.fr/academie9.htm>

- Dictionnaire environnement. (s. d.). Particule en suspension (PM). Repéré à http://www.dictionnaire-environnement.com/particule_en_suspension_pm_ID682.html
- Do, T.-M., Wang, C.-F., Hsieh, Y.-K. et Hsieh, H.-F. (2012). Metals present in ambient air before and after a firework festival in Yanshui, Tainan, Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 981-993.
- Drewnick, F., Hings, S. S., Curtius, J., Eerdekens, G. et Williams, J. (2006). Measurement of fine particulate and gas-phase species during the New Year's fireworks 2005 in Mainz, Germany. *Atmospheric Environment*, 40, 4316-4327.
- Dutcher, D. D., Perry, K. D. Cahill, T. A. et Copeland, S. A. (1999). Effects of indoor pyrotechnic displays on the air quality in the Houston astrodome. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 49, 156-160.
- EAG Laboratories. (s. d.). Spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-OES/MS), analyse ICP. Repéré à <http://www.eaglabs.fr/cm/icp-oes-ms.html>
- EDAX. (s. d.). EDS system for the TEM. Repéré à <http://www.edax.com/products/eds/team-eds-system-for-the-tem>
- Edokpayi, J. N., Odiyo, O. J., Popoola, O. et Msagati, T. A. M. M. (2016). Assessment of trace metals contamination of surface water and sediment: A case study of Mvudi river, South Africa. *Sustainability*, 8(135), 1-13.
- Environnement Canada (EC). (2004). *Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada*. Repéré à <http://publications.gc.ca/collections/Collection/En4-46-2004F.pdf>
- eRSE. (2016). 14 juillet : l'impact environnemental et sanitaire des feux d'artifice. Repéré à <https://e-rse.net/feux-artifice-pollution-impact-environnemental-21018/>
- Fatok, O. S., Lujiza, N. et Ogunfowokan, A. O. (2002). Trace metal pollution in Umtata River. *Water SA*, 28, 183-190.
- Feng, J.L., P. Sun, X.L. Hu, W. Zhao, M.H. Wu, and J.M. Fu. (2012). The chemical composition and sources of PM_{2.5} during the 2009 Chinese New Year's holiday in Shanghai. *Atmospheric Research*, 118, 435-444.
- Fleisher, O., Wichmann, H. et Lorenz, W. (1999). Release of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans by setting off fireworks. *Chemosphere*, 39(6), 925-932.
- Furimsky, E. (2000). Characterization of trace element emissions from coal combustion by equilibrium calculations. *Fuel Processing technology*, 63, 29-44.
- Gauthier, A. C. et Olivier, M.-J. (2004). Les feux d'artifice et l'environnement. *Chimiste*, 19(1), 16-19.
- Gieré, R. et Querol, X. (2010). Solid particulate matter in the atmosphere. *Elements*, 6, 215-222.
- Godri, K.J., Green, D. C., Fuller, G. W., Osto, M. D., Beddows, D. C., Kelly, F. J., Harrison, R. M. et Mudway, I. S. (2010). Particulate oxidative burden associated with firework activity. *Environmental Science and Technology*, 44(21), 8295-83 301.

- Gouvernement du Canada (GC). (2010a). *Manuel de l'artificier 2010*. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/explosifs/pyrotechnie/9904#C221>
- Gouvernement du Canada (GC). (2010b). *La pollution de l'eau : causes et effets*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/pollution-causes-effets.html>
- Gouvernement du Canada (GC). (2013a). *Fiche d'information : les polluants organiques persistants*. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=Fr&n=135D347F-1>
- Gouvernement du Canada (GC). (2013b). *Pluies acides : causes et effets*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmosphérique/enjeux/pluies-acides-causes-effets.html>
- Gouvernement du Canada (GC). (2015a). *Commerce international et investissement*. Repéré à <https://www.ic.gc.ca/app/scr/ic/sbms/cid/productReport.html;jsessionid=0001D1ENvoazJcuDMdpKcxykOgT:31070U34B1?hsCode=360410&lang=fra>
- Gouvernement du Canada (GC). (2015b). *Contaminants environnementaux : perchlorate*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/aliments-nutrition/salubrite-aliments/contaminants-chimiques/contaminants-environnementaux/perchlorate.html>
- Gouvernement du Canada (GC). (2016). Environnement et Changement climatique Canada : Recherche des données INRP. Repéré à <http://ec.gc.ca/inrp-npri/donnees-data/index.cfm?lang=Fr>
- Gouvernement du Canada (GC). (2017). *Évaluation scientifique du smog au Canada : effets sur la santé*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmosphérique/publications/evaluation-scientifique-smog-faits-saillants/chapitre-3.html>
- Gouvernement du Québec (GQ). (2017). *Guide sur le transport de matières dangereuses*. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/securite-signalisation/securite/Documents/GuideTMD.pdf>
- Grantz, D. A., Garner, J. H. B. et Johnson, D. W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environmental International*, 29, 213-239.
- Greenwood, N. N., Earnshaw, A. (2003). *Chemistry of the elements* (2e éd.). Oxford, Angleterre : Elsevier.
- Guide organisateur. (s. d.). Complexe les feux d'artifice. Repéré à <http://www.guideorganisateur.com/nouvelles/dispensieux-et-complexes-les-feux-dartifice/>
- Harvey, I. (2017, 21 mai). Thanks to Canada 150, the fireworks business is booming. *The globe and mail*. Repéré à <https://beta.theglobeandmail.com/report-on-business/small-business/sb-growth/thanks-to-canada-150-fireworks-business-is-booming/article35076091/?ref=http://www.theglobeandmail.com&>
- Harrison, T. et Shallcross, D. (2011). La chimie des feux d'artifice. *Science in school*, 21, 1-5.
- Hervo, M. (2013). *Étude des propriétés optiques et radiatives des aérosols en atmosphère réelle: Impact de l'hygroscopicité* (Thèse de doctorat). Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- Herzog, M. (2013). Bombs bursting in air: Environmental regulation of fireworks. Repéré à <http://legal-planet.org/2013/07/03/bombs-bursting-in-air-environmental-regulation-of-fireworks/>

- Huang, K., Zhuang, G., Lin, Y., Wang, Q., Fu, J. S., Zhang, R., Li J., Deng, C. et Fu, Q. (2012). Impact of anthropogenic emission on air quality over a megacity: Revealed from an intensive atmospheric campaign during the Chinese Spring Festival. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(23), 11631–11645.
- Huffpost. (2016). Les gagnants de l'International des Feux Loto-Québec 2016. Repéré à http://quebec.huffingtonpost.ca/2016/07/31/international-des-feux-loto-quebec_n_11287880.html
- IExplore. (s. d.). Top 10 Fireworks Displays Around the World. Repéré à <http://www.iexplore.com/experiences/festivals-events/top-10-fireworks-displays-around-the-world>
- Jeffries, A. (2013). How do fireworks work. Repéré à <https://www.theverge.com/2013/7/4/4489980/how-do-fireworks-work>
- Jiang, Q., Sun, Y. L., Wang, Z. et Yin, Y. (2014). Aerosol composition and sources during the Chinese Spring Festival: Fireworks, secondary aerosol, and holiday effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(11), 6023–6034.
- Joly, A., Smargiassi, A., Kosatsky, T., Fournier, M., DabekZlotorzynska, E., Celo, V., Mathieu, D., Servranckx, R., D'amours, R. et Malo, A. (2010). Characterisation of particulate exposure during fireworks displays. *Atmospheric Environment*, 44, 4325-4329.
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil–plant transfer of trace elements: An environmental issue. *Geoderma*, 122(2-4), 143-149.
- Kirkpatrick, K. (2015). How do fireworks explode in specific shapes. Repéré à <http://science.howstuffworks.com/innovation/everyday-innovations/firework-shapes.htm>
- Kong, S. F., Li, L., Li, X. X., Yin, Y., Chen, K., Liu, D. T., Yuan, L., Zhang, Y. J., Shan, Y. P. et Ji, Y. Q. (2015). The impacts of firework burning at the Chinese Spring Festival on air quality and human health: Insights of tracers, source evolution and aging processes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(4), 2167-2184.
- Korch, T. (2012, 27 juin). The explosive costs of big fireworks displays. *Fox News Network*. Repéré à <http://www.foxbusiness.com/features/2012/06/27/explosive-costs-big-fireworks-displays.html>
- Kulshrestha, U. C., Rao, T. N., Azhaguvel, S. et Kulshrestha, M. J. (2004). Emissions and accumulation of metals in the atmosphere due to crackers and sparkles during Diwali festival in India. *Atmospheric Environment*, 38, 4421–4425.
- Kumar, M., Singh, R. K., Murari, V., Singh, A. K., Singh, R. S. et Banerjee, T. (2016). Fireworks induced particle pollution: A spatio-temporal analysis. *Atmospheric Research*, 180, 78-91.
- La Ronde. (2017). L'International des Feux Loto-Québec. Repéré à <https://www.laronde.com/fr/larondefr/linternational-des-feux/accueil>

- Labrie, I. (2011, 23 juin). Les feux d'artifice interdits dans plusieurs villes. *Lapresse.ca*. Repéré à https://www.google.ca/search?q=feux+d%27artifice+interdit+municipalit%C3%A9s&rlz=1C1TSCD_enCA503CA503&oq=feux+d%27artifice+interdit+municipalit%C3%A9s&aqs=chrome..69i57.497j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- Lancaster, R. (1998). *Fireworks: principles and practice* (3^e éd.). New York, NY : Chemical publishing Co, Inc.
- Larousse. (s. d.a). Dextrine. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/dextrine/25083>
- Larousse. (s. d.b). Kraft. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/kraft/45682>
- Larousse. (s. d.c). Oxydoréduction. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/oxydor%C3%A9duction/57109>
- Lee, C. G., Yuan, C. S., Chang, J. C. et Yuan, C. (2005). Effects of aerosol species on atmospheric visibility in Kaohsiung city, Taiwan. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55(7), 1031-1041.
- Leibenluft, J. (2008). Do fireworks cause air pollution. Repéré à http://www.slate.com/articles/news_and_politics/explainer/2008/07/do_fireworks_cause_air_pollution.html
- Lemière, B., Seguin, J. J., Le Guern, C., Guyonnet, D. et Baranger, P. (2001). *Guide sur les comportements des polluants dans les sols et les nappes*. Repéré à <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50662-FR.pdf>
- Li, W., Shi, Z., Yan, C., Yang, L., Dong, C. et Wang, W. (2013). Individual metal-bearing particles in a regional haze caused by firecracker and firework emissions. *Science of The Total Environment*, 443, 464-469.
- Licudine, J. A., Yee, H., Chang, W.L. et Whelen, A. C. (2012). Hazardous metals in ambient air due to new year fireworks during 2004–2011 celebrations in Pearl city, Hawaii. *Public Health Reports*, 127, 440-449.
- Organisation mondiale de la santé (OMS). (2006). *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre*. Repéré à http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69476/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_fre.pdf
- Lin, C.-C. (2016). A review of the impact of fireworks on particulate matter in ambient air. *Journal of Air and Waste Management Association*, 66(12), 1171-1182.
- Lin, C.-C., Tsai, J.-H., Huang, K.-L., Yeh, C. K.-J., Chen, H.-L. Chen., S.-J., Lee, J.-T. et Hsieh, Y.-C. (2016). Characteristics of respirable particulate metals emitted by a beehive firework display in Yanshuei area of southern Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 2227–2236.
- Liu, D.-Y., Rutherford, D., Kinsey, M. et Prather, K. A. (1997). Real-time monitoring of pyrotechnically derived aerosol particles in the troposphere. *Analytical Chemistry*, 69(10), 1808-1814.
- Loi sur les explosifs*, L.R.C. 1985, c. E-17.
- Loi sur les explosifs*, L.R.Q., c. E-22.

- Luxorion. (s. d.). Météorologie élémentaire. Repéré à <http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-atmosphere.htm>
- Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). (2017). *Bruit environnemental : valeurs guides de l'OMS*. Repéré à <http://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/sante-environnementale/bruit-environnemental/valeurs-guides-de-l-organisation-mondiale-de-la-sante/>
- Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (1999). *L'acidité des eaux au Québec : capsules d'information*. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/pre_acid/brochure/capsule.htm
- Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2004). *Lacs acides au Québec : les causes de la dégradation*. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/lacs_acides/2004/partie2.htm
- Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2010). *Normes et critères québécois de qualité de l'atmosphère : valeurs limites*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/criteres/Normes-criteres-qc-qualite-atmosphere.pdf>
- Mocella, C. (s. d.). Chemistry of fireworks colors. Repéré à <http://munsell.com/color-blog/chemistry-fireworks-colors/>
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Minguillon, M. C., Pey, J., Rodriguez, S., Miro, J. M., Felis, C. et Gibbons, W. (2007). Recreational atmospheric pollution episodes: Inhalable metalliferous particles from firework displays. *Atmospheric Environment*, 41(5), 913-922.
- Muckle, F. (2017, 13 juillet). Dans les coulisses de L'International des Feux Loto-Québec. *TVA Nouvelles.ca*. Repéré à <http://www.tvanouvelles.ca/2017/07/13/dans-les-coulisses-de-l-international-des-feux-loto-quebec-1>
- Munster, J., Hanson, G. N., Jackson, W. A. et Rajagopalan, S. (2009). The fallout from fireworks: Perchlorate in total deposition. *Water Air and Soil Pollution*, 198, 149-153.
- Nelson, S. (2016, 4 juillet). 285 million pounds of fireworks: 4th of july by the numbers. *USA Today*. Repéré à <https://www.usatoday.com/story/news/nation-now/2016/07/03/how-america-celebrates-4th-july-numbers/86602246/>
- Netherlands national water board. (2008). *Letting off firewoks*. Repéré à <http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Water/Factsheets/English/Fireworks.pdf>
- Nishanth, T., Satheesh Kumar, M. K. et Valsaraj, K. T. (2012). Variations in surface ozone and NO_x at Kannur: Tropical, coastal site in India. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 69(2), 101-126.
- Olivier, M. (2015). *Chimie de l'environnement* (8^e éd.). Longueuil, Québec : Lab Éditions.
- Orée. (s. d.). Connaître et maîtriser les risques liés à l'environnement. Repéré à <http://risquesenvironnementaux-collectivites.oree.org/le-guide/risques-mon-territoire/sante-environnement/pollution-du-sol.html>

- Pachauri, T., Singla, V., Satsangi, A., Lakhani, A. et Kumari K. M. (2013). Characterization of major pollution events (dust, haze, and two festival events) at Agra, India. *Environmental and Science Pollution Research*, 20(8), 5737–5752.
- Petit, C. (1998). *Introduction à la chimie des éléments des groupes représentatifs*. Repéré à http://www.cheneliere.info/cfiles/pdf/elements_groupes_%20representatifs.pdf
- Perrino, C., Tiwari S., Catrambone, M., Torre, S. D., Rantica, E. et Canepari, S. (2011). Chemical characterization of atmospheric PM in Delhi, India, during different periods of the year including Diwali festival. *Atmospheric Pollution Research*, 2(4), 418–427.
- Perry, K. D. (1999). Effects of outdoor pyrotechnic displays on the regional air quality of western Washington State. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 49, 146-155.
- Pervez, S., Chakrabarty, R. K., Dewangan, S., Watson, J. G., Chow, J. C. et Matawie, J. L. (2015). Chemical speciation of aerosols and air quality degradation during the festival of lights (Diwali). *Atmospheric Pollution Research*, 7, 92-99.
- Planète vivante. (2012). Aérosols atmosphériques et réchauffement planétaire. Repéré à <http://planetevivable.org/aerosols-climat/>
- Planétoscope. (2016). Feu d’artifice: quand la magie agresse la planète. Repéré à <https://www.consoglobe.com/feu-artifice-magie-agresse-planete-3397-cg>
- Rao, P. S., Gajghate, D. G., Gavane, A. G., Suryawanshi, P., Chauhan, C., Mishra, S., Gupta, N., Rao, C. V. C. et Wate, S. R. (2012). Air quality status during Diwali Festival of India: A case study. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 89(2), 376–379.
- Ravindra, K., Mor, S. et Kaushik, C. P. (2003). Short-term variation in air quality associated with firework events: A case study. *Journal of Environmental Monitoring*, 5, 260–264.
- Règlement d’application de la Loi sur les explosifs*, c. E-22, r. 1.
- Règlement de 2013 sur les explosifs*, DORS/2013-211.
- Règlement sur l’assainissement de l’atmosphère*. RAA, c. Q-2, r. 4.1.
- Règlement sur les feux d’artifice, la pyrotechnie intérieure et les feux de joie*, R.V.Q., 426.
- Reis, L. S. L. S., Pardo, P. E., Camargos, A. S., Oba, E. (2010). Mineral element and heavy metal poisoning in animals. *Journal of Medicine and Medical Sciences*, 1(12), 560-579.
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2003). *Division de la réglementation des explosifs : rapport aux intervenants*. Repéré à <http://publications.gc.ca/collections/Collection/M81-1-2003F.pdf>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2009). *Trousse d’information pour les détaillants de pièces pyrotechniques à l’usage des consommateurs*. Repéré à <http://www.val-des-monts.net/upload/userfiles/files/Trousse%20d%20information%20pour%20les%20detaillants%20de%20pieces%20pyrotechniques.pdf>

- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2017a). *Utilisation des pièces pyrotechniques*. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/explosifs/pyrotechnie/9884>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2017b). *Utilisation des pièces pyrotechniques à effets spéciaux*. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/explosifs/pyrotechnie/9890>
- Russel, M. S. (2009). *The chemistry of fireworks* (2^e éd.). Cambridge, Royaumes-Unis : RSC Publishing.
- Sabin, D. (2017, 27 juin). July 4 Fireworks Create as Much Pollution as a 2,700-Acre Wildfire. *Inverse*. Repéré à <https://www.inverse.com/article/33365-fireworks-pollution>
- Sarkar, S., Khillare, P. S., Jyethi, D. S., Hasan, A. et Parween, M. (2010). Chemical speciation of respirable suspended particulate matter during a major firework festival in India. *Journal of Hazardous Materials*, 184, 321–330.
- SBEC Compagny. (s. d.). *Propriétés des oxydes*. Repéré à <http://sbecompany.fr/sciences/chimie/cours/L1/OXYDES.pdf>
- Sentinelles Outaouais. (2015). Feux d'artifice sur la rivière des Outaouais. Repéré à <https://www.ottawariverkeeper.ca/fr/feux-d-artifice-sur-la-riviere-des-outaouais/>
- Shabushnig, J. G. (2014). Visible particles: Regulatory and compendial requirements. Repéré à <https://www.pda.org/docs/default-source/website-document-library/chapters/presentations/ireland/visible-particles---regulatory-and-compendial-requirements.pdf?sfvrsn=6>
- Shen, Z. X., Cao, J. J., Arimoto, R., Han, Z. W., Zhang, R. J., Han, Y. M., Liu, S. X., Okuda, T., Nakao, S. et Tanaka, S. (2009). Ionic composition of TSP and PM_{2.5} during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China. *Atmospheric Environment*, 43(18), 2911–2918.
- Schmid, P., Bogdal, C., Wang, Z., Azara, V., Haag, R. et Arx, U. V. (2014). Release of chlorobenzenes, chlorophenols and dioxins during fireworks. *Chemosphere*, 114, 158-164.
- Siegel, E. (2016, 1 juillet). The physics of fireworks. *Forbes*. Repéré à <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2016/07/01/the-physics-of-fireworks/#57b31b6c1eee>
- Sijimol, M. R. et Mohan, M. (2014). Environmental impact of perchlorate with special reference to fireworks: A review. *Environmental Monitoring Assessment*, 186, 7203-7210.
- Singh, D. P., Gadi, R., Mandal, T.K., Dixit, C. K., Singh, K., Saud, T., Singh, N. et Gupta, P. K. (2010). Study of temporal variation in ambient air quality during Diwali festival in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 169, 1-13.
- Société chimique de France (SCF). (s. d.). Feux d'artifice. Repéré à <http://www.societechimiquedefrance.fr/feux-d-artifice.html>
- St-Pierre, G. (2017, 5 août). Les feux trois fois plus chers. *TVA Nouvelles.ca*. Repéré à <http://www.tvanouvelles.ca/2017/08/05/des-feux-trois-fois-plus-chers>

- Statistique Canada (SC). (2017). *Base de données sur le commerce international canadien de marchandise*. Repéré à [http://www5.statcan.gc.ca/cimt-cicm/topNCountries-pays?lang=fra&getSectionId\(\)=0&dataTransformation=0&refYr=2017&refMonth=1&freq=12&countryId=0&getUsaState\(\)=0&provId=1&retrieve=Extraire&country=null&tradeType=3&topNDefault=10&monthStr=null&chapterId=36&arrayId=0§ionLabel=&scaleValue=0&scaleQuantity=0&commodityId=360410](http://www5.statcan.gc.ca/cimt-cicm/topNCountries-pays?lang=fra&getSectionId()=0&dataTransformation=0&refYr=2017&refMonth=1&freq=12&countryId=0&getUsaState()=0&provId=1&retrieve=Extraire&country=null&tradeType=3&topNDefault=10&monthStr=null&chapterId=36&arrayId=0§ionLabel=&scaleValue=0&scaleQuantity=0&commodityId=360410)
- Steinhauser, G., Tarantik, K. et Klapötke, T. M. (2008a). Copper in pyrotechnics. *Journal of Pyrotechnics*, 27, 3–13.
- Steinhauser, G., Sterba, J. H., Foster, M., Grass, F. et Bichler, M. (2008b). Heavy metals from pyrotechnics in New Year's Eve snow. *Atmospheric Environment*, 42(37), 8616-8622.
- Sun, Y., Han, Z., Du, Z., Li, Z., Cong, X. (2017). Preparation and performance of environmental friendly Sulphur-Free propellant for fireworks. *Applied Thermal Engineering*, 126, 987-996.
- Tandon, A., Yadav S. et Attri, A. K. (2008). City-wide sweeping a source for respirable particulate matter in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 42(5), 1064–1069.
- Tang, I. N., Fung, K. H., Imre, D. G. et Munkelwitz, H. R. (1995). Phase transformation and metastability of hygroscopic microparticles aerosol. *Aerosol Science and Technology*, 23(3), 443–453.
- Teh, T., Norulaini, N. A. R., Shahadat, M., Wong, Y et Mohd, A. K. (2016). Risk Assessment of Metal Contamination in Soil and Groundwater in Asia: A Review of Recent Trends as well as Existing Environmental Laws and Regulations. *Pedosphere*, 26(4), 431-450.
- Thakur, B., Chakraborty, S., Chakraborty, A. D. et Srivastava, R. C. (2010). Air pollution from fireworks during festival of lights (Deepawali) in Howrah, India: A case study. *Atmosphere*, 23(4), 247-365.
- The chemical engineer (TCE). (2014). *Nanoparticle fireworks greener but less safe*. Repéré à <http://media.journals.elsevier.com/content/files/872-09095111.pdf>
- Tian, Y. Z., Wang, J., Peng, X., Shi, G. L. et Feng, Y. C. (2014). Estimation of the direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5}. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(18), 9469–9479.
- Townsend, S. (2014, 30 décembre). Bangs for their bucks: Which city has the biggest New Year's Eve fireworks. *The Guardian*. Repéré à <https://www.theguardian.com/cities/2014/dec/30/which-city-has-the-biggest-new-years-eve-fireworks>
- Travère, A. (2017, 14 juillet). 14 juillet : cinq questions sur les feux d'artifice. *Le Monde*. Repéré à http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2017/07/14/14-juillet-cinq-questions-sur-les-feux-d-artifice_5160395_4355770.html
- Tremblay, M-E. (2015, 20 août). L'impact environnemental des Grands feux suscite des questions. *Radio-Canada*. Repéré à <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/734825/impact-environnementale-grands-feux-casino-lac-leamy>

- Tsai, J. H., Lin, J. H., Yao, Y. C. et Chiang, H. L. (2012). Size distribution and water soluble ions of ambient particulate matter on episode and non-episode days in southern Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(2), 263–274.
- United nations environment programme. (UNEP) (2004). Stockholm convention on persistent organic pollutants. Repéré à <http://chm.pops.int/>
- United States environmental protection agency. (US EPA) (s. d.). Effects of acid rain. Repéré à <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain#other>
- United States Environmental Protection Agency. (US EPA) (2009). Persistent organic pollutants: A global issue, a global response. Repéré à <https://www.epa.gov/international-cooperation/persistent-organic-pollutants-global-issue-global-response>
- United States Environmental Protection Agency. (US EPA) (2017). NAAQS table. Repéré à <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table#3>
- Université virtuelle environnement et développement (UVED). (s. d.). Absorption (AAS) et émission atomique (AES). Repéré à http://www.cima.ualg.pt/piloto/UVED_Geochemie/UVED/site/html/1/1-3/1-3-2/1-3-2-4.html
- Vecchi, R., Bernardoni, V., Cricchio, D., D'Alessandro, A., Fermo, P., Lucarelli, F., Nava, S., Piazzalunga, A. et Valli, G. (2008). The impact of fireworks on airborne particles. *Atmospheric Environment*, 42, 1121–1132.
- Vella, A. J., Chircop, C., Micallef, T. et Pace, C. (2015). Perchlorate in dust fall and indoor dust in Malta: An effet of fireworks. *Science of Total Environment*, 521-522, 46-51.
- Ville de Joliette. (2016). Rappel-Interdiction de vendre des feux d'artifice. Repéré à <http://www.ville.joliette.qc.ca/index.jsp?p=146&f=987>
- Ville de Montréal. (2016). *Qualité de l'air à Montréal*. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/enviro_fr/media/documents/rsqa_bilan2016_fr.pdf
- Ville de Montréal. (s. d.). Pollution des sols et histoire. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,74643801&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Ville de Québec. (2017). Feux d'artifice. Repéré à https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/incendie/conseils/fiche_feux_artifices.aspx
- Vox. (2017). The fourth of july, made in China. Repéré à <https://www.vox.com/policy-and-politics/2017/7/3/15915266/fourth-of-july-made-in-china>
- Wang, Y., Zhuang, G., Xu, C. et An, Z. (2007). The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing. *Atmospheric Environment*, 41, 417–431.
- Wilkin, R. T., Fine, D. D. et Burnett, N. G. (2007). Perchlorate behavior in municipal lake following displays. *Environment Science and Technology*, 41, 3966-3871.

- World's top export (WTEx). (2017). Top fireworks exporters. Repéré à <http://www.worldstopexports.com/fireworks-exporters/>
- Wu, J., Oldi, F. J., Kannan, K. (2011). Fate of perchlorate in a man-made reflecting pond following a fireworks display in Albany, New York, USA. *Environmental Toxicologie Chemistry*, 30(11), 2449-2455
- Yang, L. X., Gao X. M., Wang, X. F., Nie, W., Wang, J., Gao, R., Xu, P. J., Shou, Y. P., Zhang, Q. Z. et Wang, W. X. (2014). Impacts of firecracker burning on aerosol chemical characteristics and human health risk levels during the Chinese New Year Celebration in Jinan, China. *Science of The Total Environment*, 476-477, 57-64.
- Yarett, I. (7 janvier, 2009). Are fireworks chemicals dangerous? *Newsweek*. Repéré à <http://www.newsweek.com/are-fireworks-chemicals-dangerous-81679>
- Yerramsetti, V. S., Sharma, A. R., Navlur, N. G. et Rapolu, N. (2013). The impact assessment of Diwali fireworks emissions on the air quality of a tropical urban site, Hyderabad, India, during three consecutive years. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(9), 7309-7325.
- Yuan, C. S., Lee C. G., Liu, S. H., Chang, J. C., Yuan, C. et Yang, H. Y. (2006). Correlation of atmospheric visibility with chemical composition of Kaohsiung aerosols. *Atmospheric Research*, 82(3-4), 663-679.

ANNEXE 1 – GRILLE DE L'INFLUENCE ET DE L'INTÉRÊT DES PARTIES PRENANTES

Les parties prenantes du secteur pyrotechnique sont positionnées dans le graphique ci-dessous, inspiré de la grille de Mendelow, selon leur niveau d'influence et d'intérêt.

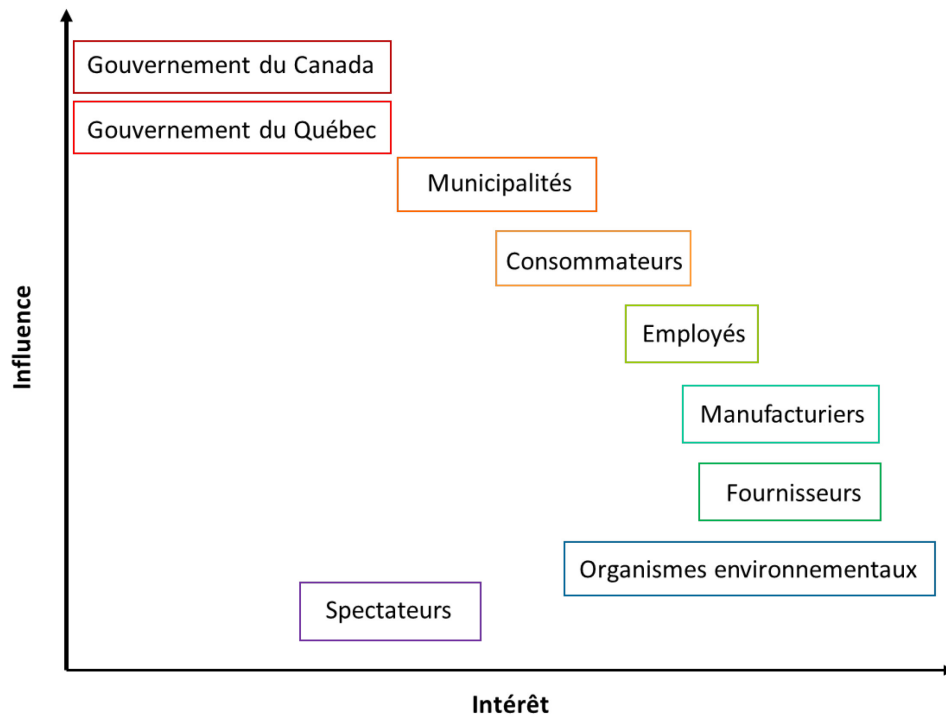


Figure A.1 Parties prenantes impliquées dans le secteur pyrotechnique

ANNEXE 2 – FACTEURS D'ÉMISSION DE MÉTAUX (tiré de : Croteau et al., 2010)

FE de plusieurs métaux pour quatre types de feux d'artifice. Les valeurs utilisées à la section 5.2 sont les moyennes de tous les FE présentés ci-dessous pour chaque élément.

Tableau A.1 FE (mg de substances émises/kg de feux d'artifice) de divers éléments pour quatre types de pièces pyrotechniques

Analyte	Dragon Eggs	Ribbon Fuse ^b	Roman Candle B	Fountain A ^c	Fountain B ^c	Fountain C	Fountain D
TP ^d	140,000	130,000	86,000	67,000	94,000	87,000	81,000
K	34,000	45,000	33,000	23,000	35,000	36,000	33,000
Mg	6800	2100	1300	3400	3400	2500	2400
Ba	3000	6300	30	49	120	310	1400
Na	< 380	57	< 210	130	1200	850	< 120
Ca	51	22	33	210	160	41	690
Cu	7900	3000	4600	2400	1900	200	45
Al	1900	1000	760	1500	1500	1300	850
Pb	16,000	27,000	10	2.0	3.9	3.3	120
Ga	680	1400	6.8	4.8	14	71	320
Sr	15	10	8.5	190	150	30	710
Zn	75	630	32	400	79	24	120
Fe	120	100	560	50	63	51	42
Bi	0.6	3.7	540	310	15	0.3	< 0.1
P	53	11	20	12	17	13	23
Mn	19	37	10	31	27	26	39
Ti	11	4.1	17	59	71	9.1	2.8
Cr	120	<1.7	<6.4	6.9	47	3.9	<3.5
Sn	15	0.6	6.5	20	14	0.2	1.7
Si	<190	<24	<110	4.0	<13	47	350
Cr ⁶⁺	12	na	7.1	0.2	0.6	na	na
Rb	8.8	6.7	3.7	3.8	6.4	4.5	3.3
Sb	5.3	0.5	1.4	0.8	0.5	0.1	0.6
V	<0.4	<1.7	<6.4	6.9	47	3.9	<3.5
Te	7.0	<0.7	<2.2	<0.1	<0.3	<0.7	<1.2

na – Not analyzed.

^a Metals for which the emission rate was greater than 5 mg kg⁻¹ (See Supplementary information, Table A1 for other metal emission factors).

^b Mean of four replicate samples collected during a single test event; mean CV = 11%.

^c Mean of duplicate test events; Fountain A mean CV = 46%; Fountain B mean CV = 23%.

^d Total airborne particulate matter.